ONDAS EN EL OCEANO GALACTICO • DESARROLLO DE ESTOMAS

INVESTIGACION y CIENCIA

DICIEMBRE 2005
6,00 EUROS

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

MUTACIONES PIONERAS

NUEVAS DIANAS FARMACOLOGICAS

EL MOVIMIENTO BROWNIANO SEGUN EINSTEIN

UNA TIERRA PRIMIGENIA

LOS QUIPUS INCAS

POLARIZACION DEL FONDO COSMICO DE MICROONDAS



00351
9 770210 136004

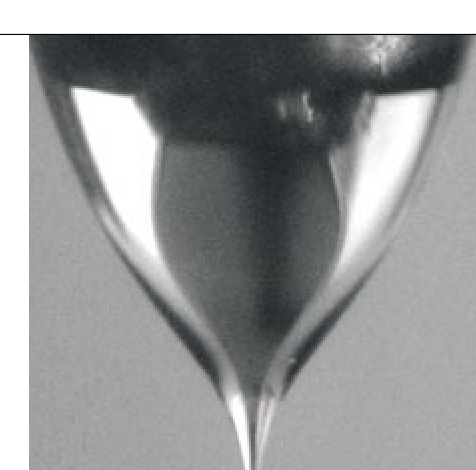


Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

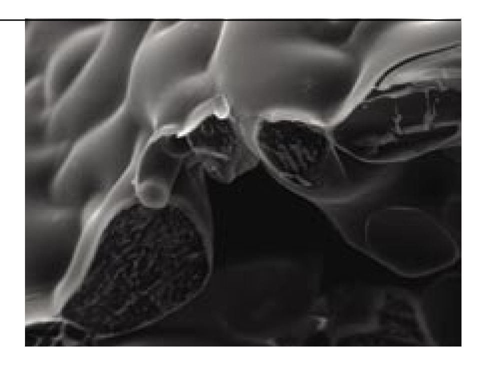
Diciembre de 2005

Número 351

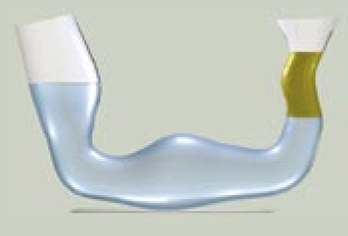




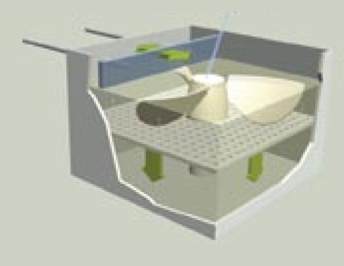




5	3			7				
6			1	9	5			
	9	8					6	
8				6				3
4			8		3			1
7				2				6
	6					2	8	
			4	1	9			5
				8			7	9









DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR EDITOR Michelle Press
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Steve Mirsky, George Musser y Christine Soares
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
GENERAL MANAGER Michael Florek
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Dean Sanderson
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN John Sargent

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca
Trigo, 39, Edif. 2
28914 Leganés (Madrid)
Teléfono 914 819 800

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD

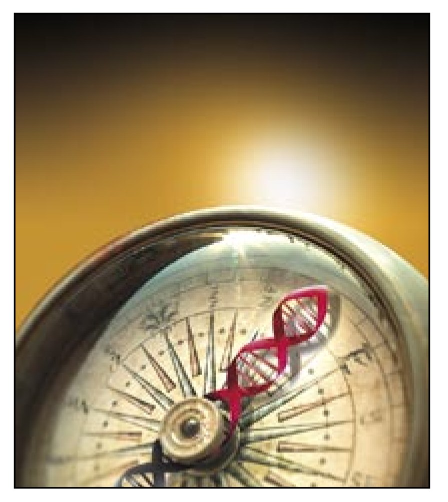
Madrid:
MOSAICO COMUNICACION, S. L.
Santiago Villanueva Navarro
Tel. y fax 918 151 624
Móvil 661 472 250
mosaicocomunicacion@yahoo.es

Cataluña:
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

M.ª Rosa Zapatero: *Ondas en el océano galáctico* y *Polarización del fondo cósmico de microondas*; Juan Manuel González Mañas: *Nuevas dianas farmacológicas*; Sònia Ambrós: *Una Tierra primigenia fría*; Luis Bou: *Ciencia y gastronomía* y *Los quipus incas*; I. Nadal: *El movimiento browniano según Einstein*; Felipe Cortés: *Mutaciones pioneras*; J. Vilardell: *Hace...*, *Apuntes* e *Ideas aplicadas*; Jürgen Goicoechea: *Curiosidades de la física*



Portada: *Scientific American*

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	65,00 euro	120,00 euro
Resto del mundo	90,00 euro	170,00 euro

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España



HACE

...cincuenta años

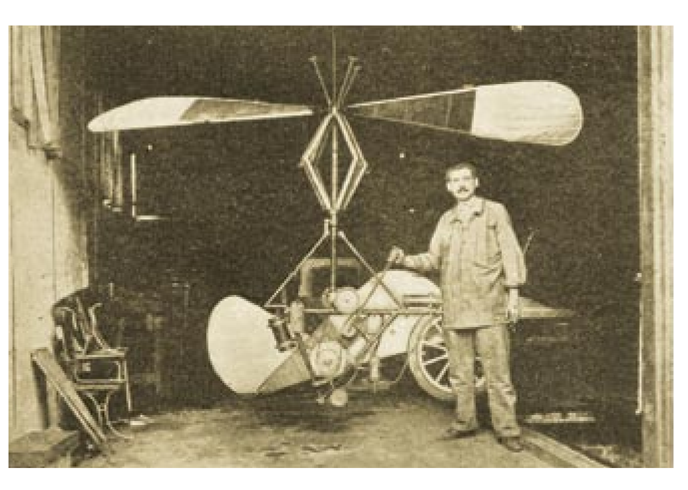
AVES EXTRATERRESTRES. «En cuestión de pocos años se dejará ver en el firmamento un objeto nuevo. No resultará muy llamativo. Pero cuando levantemos la cabeza y, al observar atentamente, captemos los pálidos destellos de su fuselaje cruzando el cielo, sentiremos la emoción de estar presenciando un acontecimiento histórico. Pues el minúsculo objeto que circulará por la bóveda celeste será de un metal conocido por el hombre; se tratará de un satélite que el hombre habrá construido con sus manos y lanzado al espacio desde la Tierra. Los satélites que EE.UU. pondrá en órbita con ocasión del Año Internacional de la Geofísica (1957-58) no son aún, desde luego, sino apuntes y bosquejos sobre papel.»

¿CURA O INTOXICACIÓN? «En 1940, un oftalmólogo de Boston se encontró de repente ante una nueva enfermedad que desafiaba su capacidad de diagnóstico, por no hablar de tratamiento. En el curso de sólo unos meses examinó seis casos de bebés que habían perdido la vista por alguna causa desconocida. Hacia julio de 1950, las estadísticas parecían revelar que los niños que desarrollaron una fibroplasia retrolental habían sido tratados por hipoxia, tal como evidenciaba el hecho de que fueron mantenidos un tiempo más prolongado en la cámara de oxígeno. Nadie se había percatado aún de que la administración de oxígeno podría constituir la causa del problema. Cuando en los hospitales se empezaron a exponer a los bebés prematuros a atmósferas altamente oxigenadas en novedosas incubadoras, la emergencia de la fibroplasia retrolental alcanzó proporciones epidémicas. La atmósfera empleada solía contener un 50 por ciento de oxígeno.»

...cien años

LA PRIMERA TRAVESÍA. «Las últimas noticias acerca del capitán noruego Roald Amudsen, según las cuales ha logrado hallar y atravesar el histórico Paso del Noroeste, así como localizar con certeza la posición del polo norte magnético, han suscitado un gran interés en los círculos científicos. La búsqueda del Paso del Noroeste empezó nada más establecerse que América no estaba unida a Asia; parece, sin embargo, que el capitán Amudsen es el primero en abrirse paso por el extremo septentrional del continente. Partió de Noruega el uno de junio de 1903, en su balandra de 46 toneladas 'Gjoa', con una tripulación de ocho hombres. La 'Gjoa' está invernando cerca de Kay Point, en la isla de Herschel. La notificación sobre la satisfactoria terminación de la expedición se recibió desde Fort Egbaert, Alaska.»

HELICÓPTERO PRIMITIVO. «Dos famosos aeronautas franceses, los señores Louis Goddar y Felix Faure, han experimentado con hélices propulsoras horizontales. Una de éstas, de seis aletas, accionada a pedales mediante un bastidor de bicicleta especialmente aparejado, consiguió una tracción vertical de tres kilopondios. La reducción del número de paletas mejoró los resultados. Con un motor de gasolina de 1,75 caballos, la fuerza de sustentación aumentó enseguida hasta 23 kilopondios. Mediante la adición de una hélice y el empleo de movimiento alternativo, se logró que la máquina llegara a los 100 kilopondios con un consumo de 100 caballos.»



Ascenso en vertical, helicóptero primitivo, 1905.

...ciento cincuenta años

COMBUSTIÓN INTERNA. «Sr. Director: Concédame un pequeño espacio en su apreciada revista para comentar que el efecto de percusión de las mezclas explosivas de gas y aire, cuando se inflaman en un motor adecuadamente construido, carecen de la naturaleza peligrosa que ustedes suponen, pues gran parte de las sacudidas que se observaron en el funcionamiento de la máquina resultan de un repentino y violento cierre de las válvulas en el momento del encendido, defecto que será remediado. Han pasado por alto también la posibilidad de emplear como combustible trementina, nafta, aceite de brea y otros hidrocarburos líquidos. Al no haber caldera, el ahorro resulta notable; además, el reducido volumen del depósito para el combustible deja mucho espacio para carga y pasajeros. —Alfred Drake, Philadelphia.» [*Nota de la redacción: el motor pionero de Drake empleaba tubos caldeados para encender una mezcla de aire y combustible.*]

UNA MALA IDEA. «En una reciente reunión de la Asociación Británica para el Progreso de la Ciencia, Senor Susini presentó una ponencia sobre el valle del Amazonas. Afirma que 'las regiones bañadas por el Amazonas, ganadas a las tribus salvajes, a los animales feroces y a los dañinos reptiles que ahora las infestan, y surcadas por la reja del arado, podrían sustentar a la población del mundo entero.'»

BIOLOGIA MARINA

Un viaje transoceánico

Una hembra de tiburón blanco ha completado un viaje transoceánico de 20.000 kilómetros en nueve meses. El equipo de Ramón Bonfil, de la Sociedad Conservacionista Mundial, radicada en Nueva York, la capturó y marcó frente a las costas sudafricanas en noviembre de 2003. El animal tardó 99 días en llegar al oeste de Australia; en agosto de 2004 estaba de nuevo en aguas africanas. Pasó dos tercios de ese tiempo cerca de la superficie, de lo que se desprende que podría valerse de claves del firmamento para navegar. Con tan asombroso viaje, la hembra batió las marcas conocidas de velocidad en largas distancias para animales marinos. Un desplazamiento así induce a pensar que quizá se crucen poblaciones muy distantes de tiburones blancos. También ha hecho temer que resulte más difícil salvar a esta especie en peligro de extinción: si bien las leyes nacionales la protegen de la pesca en las respectivas aguas jurisdiccionales, en aguas internacionales es vulnerable.

—Philip Yam



Nicole, hembra de tiburón blanco denominada así en honor de Nicole Kidman, ha establecido un récord de velocidad de larga distancia para animales marinos.

FISICA

Movimiento browniano

En un artículo de este mes se explica la fundamental contribución de Einstein a la explicación del movimiento browniano: las partículas suspendidas en un fluido tiemblan por los impactos de las moléculas del fluido. Pero si su idea básica sigue estando vigente, el conocimiento de los detalles no se ha detenido. Einstein supuso que el movimiento browniano era completamente aleatorio. Se venía defendiendo que la inercia del fluido lleva a que las trayectorias de las partículas resulten más predecibles de lo que correspondería a si sólo obedeciesen al azar. Un experimento lo ha confirmado. Para ello, se ha seguido con láseres el movimiento de esferas de vidrio y de plástico de una micra de diámetro, a intervalos de microsegundos y a la escala de los nanómetros. Este conocimiento más preciso del movimiento de las partículas en un fluido tendrá gran importancia para el estudio de la dinámica celular y la construcción de nanoestructuras.

—Charles Q. Choi

SIDA

HIV debilitado

¿Ha perdido virulencia el virus del sida? Tal parece. Se extrajo VIH-1 de pacientes que no habían recibido tratamiento; las muestras iban de 1986 a 1989 y de 2002 a 2003. Tras inocular el virus en sangre y células inmunitarias humanas, se observó que el VIH viejo se reproducía bastante mejor que el procedente de muestras más recientes; también parecía menos sensible a los antirretrovirales. Es posible que VIH-1, la cepa más común del virus en todo el mundo, se haya estado adaptando a los seres humanos a medida que pasaba de un individuo a otro y haya perdido virulencia para prolongar su supervivencia en el hospedador. Uno de los investigadores que han obtenido este resultado afirma que el virus podría dejar de ser letal en 20, 200 o 2000 años; sin nuevos estudios, no se puede decir más sobre el plazo en que podría ocurrir.

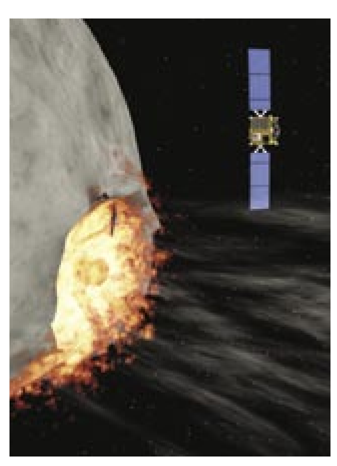
—Charles Q. Choi

OBJETOS CERCANOS A LA TIERRA

Don Quijote en 2002 AT4

La Agencia Espacial Europea ha escogido dos asteroides, 2002 AT4 y 1989 ML, para decidir, más adelante, en 2007, cuál de los dos recibirá en 2011 la misión Don Quijote. El objetivo es ir ensayando la desviación de asteroides, por si algún día hubiera que alejar uno de la Tierra (ninguno de los dos elegidos, de unos 500 metros de diámetro, se acercará a nuestra órbita). La misión enviará dos naves al asteroide elegido. Una de ellas, Hidalgo, de 380 kilogramos de peso, se estrellará contra el cuerpo celeste a unos 48.000 kilómetros por hora. La otra, Sancho, llevará para entonces medio año orbitando alrededor del asteroide. Observará su órbita antes y después del choque, y recogerá los datos de los sismógrafos que dejará sobre la roca.

—Charles Choi





En la misión Don Quijote, Hidalgo se estrellará contra un asteroide mientras Sancho observa.

M. MEYER *MCM* (*arriba*); ESA/DEIMOS SPACE (*abajo*)

INGENIERIA GENETICA

El maíz y los transgénicos

Un artículo aparecido en *Nature* en 2001 desató la polémica al afirmar que cierto maíz modificado genéticamente había acabado dentro del estado mexicano de Oaxaca, donde no debería haber llegado: la gramínea transgénica podría haber invadido los cultivos naturales. La revista se retractaría del artículo un año después por no estar basado en pruebas suficientes. Sin embargo, la investigación ulterior del gobierno mexicano vino a respaldarlo. Ahora, investigadores mexicanos y estadounidenses han analizado unas 154.000 semillas de 870 individuos, procedentes de 125 plantaciones de Oaxaca. Esperaban encontrar una frecuencia de transgénicos de hasta un cinco o un diez por ciento; para su sorpresa, no había ni rastro. Quizás el maíz transgénico no soportase el duro clima de las montañas y las características del suelo donde la variedad local crece, o tal vez hayan tomado los campesinos precauciones extraordinarias al saber que podían introducirse genes indeseados. *—Charles Q. Choi*



Maíz en una tienda de Mérida, Yucatán.

MATERIA BLANDA

Arenas movedizas

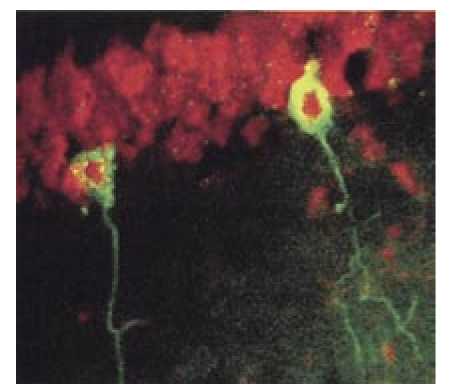
Si se cae en arenas movedizas, se queda atrapado. Si quien ha caído se mueve dentro de las arenas, se hunde más. Pero ¿se puede acabar, como en tantas películas, sumergido bajo la superficie de las arenas? Según un grupo de investigadores de centros franceses y holandeses, no es posible: un ser humano quedará retenido en las arenas movedizas, pero no morirá tragado por ellas. El grupo estudió arenas movedizas naturales, de un lago salado cercano a Qom, en Irán, y otras creadas en el laboratorio. Ambas mezclas constaban de arena, arcilla y sal. Cuando se somete a tensión la mezcla, como cuando se introduce en ella un cuerpo que se mueve, el delicado gel coloidal arcilloso que mantiene firme la arena se desestabiliza —la sal es fundamental para que ocurra tal cosa— y la mezcla se licúa tanto más cuanto mayor sea la tensión, es decir, el movimiento del cuerpo introducido. Cuesta escapar de ahí porque se segregan una fase acuosa y una fase arenosa; ésta, densamente apretada, viscosa, es la que atrapa con mucha fuerza a la víctima. El grupo simuló el movimiento de un cuerpo en las arenas y midió cómo se hundían entonces bolas de aluminio de dos milímetros. Pese a ser más densas que las arenas en reposo descansaban sobre ellas, pero con un movimiento suficientemente intenso la licuefacción era tan rápida que no daba tiempo a la sedimentación de la arena y las bolas se hundían. Ahora bien, resultaba imposible hundir bolas menos densas que el agua. Y la densidad del agua viene a ser también la densidad de seres humanos y animales: sólo, pues, podrán hundirse a medias en las arenas, pero no quedar sumergidos por completo en ellas.

NEUROBIOLOGIA

De hijo a madre

Las células fetales pueden entrar en la sangre de la madre, donde permanecen, en el caso de los seres humanos, hasta 27 años después del parto. Igual que las células troncales, maduran en células de distintos tipos. En un laboratorio de Singapur, los investigadores han apareado hembras de ratón normales con machos transgénicos para que expresasen una proteína con fluorescencia verde. Hallaron células fetales verdes en los cerebros maternos; hasta una de cada mil, incluso una de cada cien. Allí, las células fetales se transformaron en células que podrían ser neuronas, en astrocitos (que alimentan a las neuronas), en oligodendrocitos (que las aislan) y en macrófagos (que ingieren gérmenes y células dañadas). Cuando se lesionaron químicamente los cerebros, el número de células fetales que migraron a las zonas deterioradas sextuplicó el que iba a otras partes. No se sabe cómo atraviesan la barrera hematoencefálica que rodea el cerebro e impide la entrada en éste de la mayoría de los compuestos. Es probable que las células fetales entrasen también en cerebros de machos y de hembras no preñadas, habida cuenta de que no parece haber grandes diferencias entre sus barreras de capilares y las de las hembras preñadas. De ahí la esperanza de encontrar la forma de tratar enfermedades cerebrales con células fetales o del cordón umbilical sin tener que trepanar el cráneo, tan sólo con inyecciones intravenosas. Se ignora, con todo, si las células que deberían llegar al cerebro no se injertarían también en otros órganos, ni si eso sería un problema. Se desconoce también si las células fetales entrarían en un cerebro humano con la misma facilidad. El equipo de Singapur planea abordar tejido cerebral postmortem procedente de madres con hijos varones. La presencia del cromosoma Y en el tejido demostraría que el fenómeno ocurre también en los humanos.

—Charles Q. Choi



Las células fetales (*verde*) de ratón pueden abrirse paso por la barrera hematoencefálica hasta el cerebro de la madre. Los núcleos neuronales están teñidos de rojo.

ROBERT HOLMES *Corbis* (*arriba*); *"FETAL MICROCHIMERISM IN THE MATERNAL MOUSE BRAIN"* POR XIAO-WEI TAN ET AL. EN *STEM CELLS ONLINE*; 10 DE AGOSTO DE 2005 (*abajo*)



Ondas en el océano galáctico

Las hermosas configuraciones de las galaxias trascienden la estética al resultar esenciales para su crecimiento y evolución

Françoise Combes



1. LA MAYORIA DE LAS GALAXIAS ESPIRALES, como la galaxia NGC 1097 (*arriba*), presentan un rectángulo central, o "barra", de estrellas. Otras no, como Messier 51 (*página contigua*). Ambos tipos de galaxias espirales están formados por un disco plano y en rotación de estrellas, gas y polvo. Las barras y los brazos son las regiones más densas. A pesar de los avances recientes, la naturaleza y el origen de estas estructuras siguen sin estar claros.

NASA, AGENCIA ESPACIAL EUROPEA, STEVEN BECKWITH *Instituto de Ciencias del Telescopio Espacial* Y HUBBLE HERITAGE TEAM (*izquierda*); STEVE LEE Y DAVID MALIN *Observatorio Anglo-Australiano* (*derecha*)

Pocos objetos más bellos habrá en los cielos que las galaxias espirales. Un ejemplo clásico es la galaxia Messier 51, que tanto se parece a un ciclón gigante; uno de sus primeros nombres fue "remolino". Las estrellas más brillantes de esta galaxia están confinadas en sus "brazos", como perlas de un collar que girase en espiral alrededor de una gema. Entreveradas en esas sartas de estrellas se extienden oscuras fajas de polvo, que descubren el gas interestelar del que nacen las estrellas. Aunque en Messier 51 y en muchas otras galaxias la espiral nace de una aglomeración central, esférica, de estrellas, en la mayoría de las galaxias espirales arranca de una barra, de un largo rectángulo luminoso de estrellas. Una galaxia barrada se parece a los aspersores giratorios que riegan el césped, donde el agua fluye por un tubo recto, emerge en ángulo recto y se gira entorno.

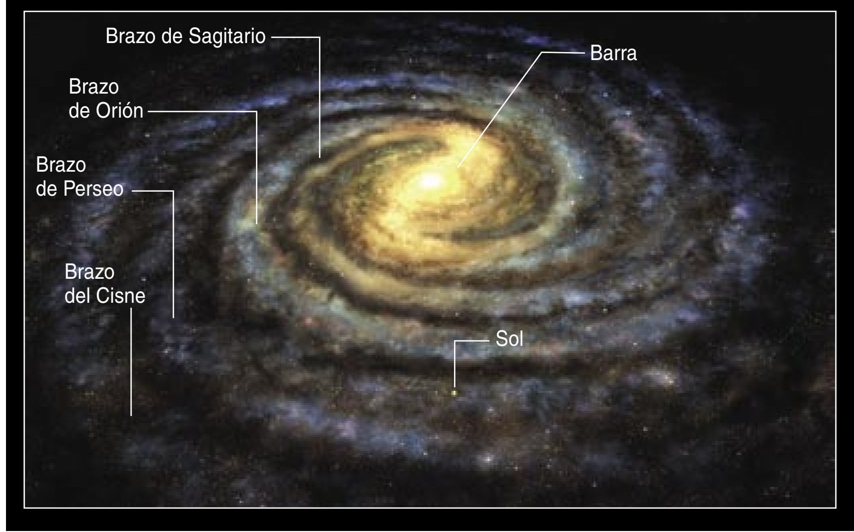
Suele creerse que nuestra galaxia, la Vía Láctea, es una espiral pura, pero ahora sabemos que se trata de una galaxia barrada. La prueba, en un principio indirecta, fue conformándose a partir de 1975: las estrellas y el gas que hay en medio de la galaxia no siguen las órbitas que les corresponderían si el modelo espiral llegase hasta el núcleo mismo de la galaxia. Las exploraciones más recientes del firmamento en luz infrarroja cercana, que atraviesa las nubes de polvo que impiden ver el centro galáctico, han observado la barra directamente, eliminando cualquier duda.

Las barras y las espirales podrían parecer formas perennes, como un sólido molinete, pero en realidad son dinámicas: ondas que barren el disco de estrellas, gas y polvo y a menudo redistribuyen con violencia el material. Evolucionan, aunque con tal parsimonia, que sólo percibimos una imagen congelada, correspondiente a un instante de sus mutaciones. Esas ondas fueron una de las manifestaciones de un tema repetido en la astronomía del decenio pasado: la asimilación de que ciertas propiedades de las galaxias que parecían inmutables (así, su estructura), sufren grandes cambios con el tiempo. El proceso de metamorfosis mejor conocido es el canibalismo galáctico; en virtud del mismo, la fusión con una galaxia vecina puede convertir una ordenada y tranquila galaxia espiral en una galaxia elíptica sin estructura, donde las estrellas, como las abejas en su colmena, se mueven de manera desordenada. Crece, sin embargo, el convencimiento de que las ondas internas desempeñen una importancia mayor en la evolución de las galaxias.

LA BARRA DE LA VIA LACTEA

Se creía que nuestra galaxia pertenecía a la categoría de las galaxias espirales puras, pero hoy sabemos que es una galaxia barrada. En la imagen superior, obtenida por el proyecto cartográfico infrarrojo 2MASS, se observa a la Vía Láctea de canto. El núcleo galáctico está en el centro y los colores representan la intensidad de la luz en tres longitudes de onda del infrarrojo cercano. La galaxia es más gruesa de lo esperado, y el núcleo más extenso y ancho a la izquierda que a la derecha. Estos rasgos nos remiten a una barra girada de 25 a 45 grados con respecto a la visual del centro galáctico, tal y como se muestra en el dibujo (*abajo*).





2MASS/J. CARPENTER, T. H. JARRETT Y R. HURT (*arriba*); DON DIXON (*abajo*)

Resumen/Ondas galácticas

- Desde los años sesenta se sabe que las conformaciones espirales de las galaxias no son estructuras fijas, sino oscilaciones transitorias de la densidad del material. Las estrellas y las nubes de gas se agrupan y separan arrastradas por la coreografía orbital que ellas mismas crean, como si, tras arrojarse una piedra cósmica a la galaxia, se hubiesen generado ondas de movimiento lento.
- Hasta hace muy poco tiempo, se desconocía la razón de aspectos cruciales de estas ondas; por ejemplo, el porqué de los números relativos de galaxias con una u otra forma. El ingrediente necesario que no se había tenido en cuenta en los modelos era el gas interestelar, que ejerce un efecto desproporcionado para su masa.
- Las ondas transportan momento angular y dan así a la materia la oportunidad de agruparse en el medio de la galaxia; el agujero negro del centro sería uno de los beneficiarios. Las ondas siguen un ciclo que va cambiando la estructura de la galaxia. Estos descubrimientos teóricos están recibiendo el respaldo de observaciones de galaxias tanto lejanas como próximas.

Discos flexibles

Todas las galaxias espirales, barradas o no, rotan; las estrellas giran regularmente alrededor del centro. Pero no rotan como un sólido rígido. Las estrellas no se mueven todas al unísono. En la Vía Láctea, las interiores han girado alrededor del centro miles de veces durante los últimos cinco mil millones de años, mientras que el Sol, alojado en medio del disco, ha completado sólo unas 20 vueltas. Esta rotación variable es incompatible con que barras y espirales constituyan estructuras rígidas. Si fuesen rígidas, se enroscarían rápidamente alrededor del centro, del mismo modo que una cuerda alrededor de un torno.

Durante muchos años, los astrónomos se han preguntado cómo se mantiene la estructura espiral. En los años sesenta, el misterio se resolvió parcialmente con la teoría de las ondas de densidad, de Chia-Chiao Lin y Frank Shu, ambos del Instituto Tecnológico de Massachusetts. Según esa teoría, las barras y los brazos espirales son las "crestas" de las ondas de densidad, donde las estrellas se agolpan temporalmente, como si se tratara de un atasco cósmico. Las estrellas entran y salen de la onda igual que los coches entran y salen del atasco.

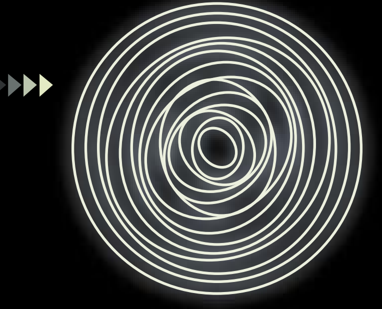
La onda espiral misma se debe a la alineación de las órbitas estelares. La órbita de una estrella en una galaxia no se parece a la órbita de un planeta alrededor del Sol o de un satélite en torno a la Tierra, porque la galaxia no está dominada por un cuerpo central. Si bien muchas galaxias poseen un agujero negro central, éste representa sólo una pequeña fracción de la masa galáctica. En general, la parte mayor de la masa galáctica se reparte en un bulbo central extenso; el centro de la galaxia no equivale a una masa puntual. Por ello, las estrellas trazan una especie de rosetón espiral (como los que se dibujan con un espirógrafo): una elipse que no se cierra sobre sí misma, sino que se desplaza cada vez que la estrella completa una revolución. El Sol, por ejemplo, necesita unos 230 millones de años para recorrer su órbita elíptica. Durante ese tiempo, la órbita se desplaza (precesiona) unos 105 grados; por tanto, la elipse del Sol completa una rotación completa una vez cada 790 millones de años.

ORDENACION DE LAS ORBITAS

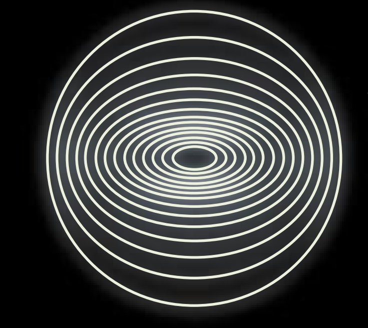
Las barras y las estructuras espirales representan ondas que atraviesan la galaxia. Cuando un frente de onda entra en una región, las estrellas se aproximan unas a otras; cuando la onda se aleja, se separan de nuevo. La onda no empuja directamente a las estrellas; sólo concierta con sutileza sus órbitas.



ROSETONES DE ORBITAS, descritos por estrellas sometidas al complejo campo gravitatorio de la galaxia. Una estrella se mueve alrededor de una galaxia en una elipse, pero la propia elipse también se desplaza. Este segundo movimiento constituye la materia prima de las ondas galácticas.



NO EXISTE MOVIMIENTO ONDULATORIO cuando las órbitas se orientan aleatoriamente. (Por simplicidad, esta figura presenta sólo una muestra de órbitas, las que aparecen cerradas cuando se las observa desde un sistema de referencia en rotación.)



LA ONDA BARRADA aparece cuando se alinean las órbitas. La gravedad hace que las elipses se muevan al unísono, manteniendo su alineamiento. El frente de onda es la región de mayor densidad estelar, a lo largo del eje mayor de la elipse.



LA ONDA ESPIRAL aparece cuando las elipses se mueven al unísono pero no están perfectamente alineadas; cada elipse se halla ligeramente ladeada con respecto a sus vecinas. La densidad de estrellas es mayor allí donde las elipses se amontonan.



LA ESPIRAL BARRADA surge cuando las órbitas cercanas al núcleo de la galaxia están alineadas, pero las más alejadas se ladean.

ALISON KENDALL

Cuando las elipses de las estrellas giran a velocidades muy diferentes, la galaxia no presenta estructura ondulatoria. Las estrellas pasan cerca unas de otras aleatoriamente, para alejarse muy pronto, a la manera en que los automóviles se agolpan en algún instante, incluso en una autopista de circulación fluida. Se produce la onda cuando muchas elipses, si no todas, rotan a la misma velocidad. En una barra, las elipses están alineadas y giran de manera concertada, generando una región de mayor densidad a lo largo del eje mayor. En la onda espiral, las órbitas se desalinean progresivamente, por lo que la región de mayor densidad se curva y crea una espiral.

En resumen, las órbitas estelares se pueden mover al unísono aunque no se comporten así las estrellas mismas. ¿Por qué se sincronizan las elipses? En virtud de una inestabilidad gravitatoria espontánea. Puesto que la gravedad en estos sistemas no es una fuerza externa fija, sino el producto de las propias estrellas, las ondas se pueden retroalimentar. El proceso comienza cuando las órbitas estelares se alinean por casualidad. Amplificada por la proximidad, la gravedad de las estrellas modifica la velocidad de rotación de las elipses. Las más rápidas se frenan y las más lentas se aceleran, hasta que se alcanza una sincronización. Cuando una estrella penetra en la onda, la gravedad la atrapa sólo temporalmente; pasado un tiempo, queda libre y sale de la onda. Las estrellas que entran por el otro lado de la onda aseguran la supervivencia de la estructura. Los brazos de una galaxia espiral consisten en una densidad local de estrellas más alta debida a la alineación de las órbitas estelares

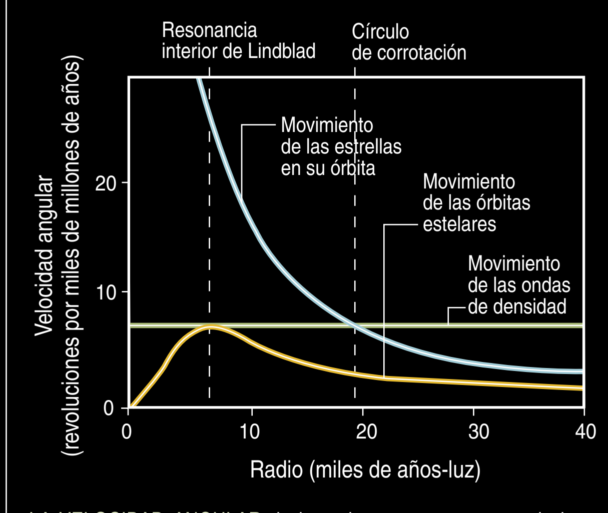
El gas y las ondas

En las regiones interiores de una galaxia las estrellas se mueven más deprisa que la onda y, por tanto, la alcanzan; en las regiones externas, las estrellas son más lentas, por lo que es la onda la que se aproxima por detrás.

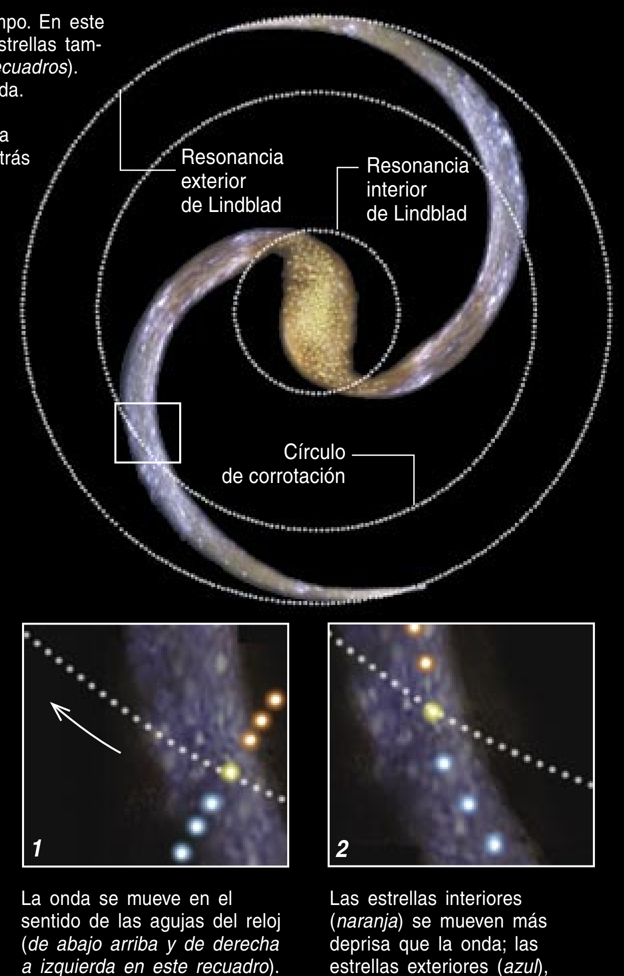
ANATOMIA DE UNA ONDA

Las barras y los brazos espirales recuerdan a la ola que recorre un estadio. Cuando el frente de onda los alcanza, los espectadores actúan de manera coordinada: se levantan y sientan a la vez. Las órbitas estelares de una galaxia se disponen de manera que acercan las estrellas. Las ondas galácticas presentan la complicación adicional de que las estrellas también se mueven.

LOS BRAZOS ESPIRALES son una onda captada en un instante de tiempo. En este ejemplo, la onda se propaga en el sentido de las agujas del reloj. Las estrellas también se desplazan en el mismo sentido, pero a una velocidad distinta (*recuadros*). Las estrellas de las regiones interiores se mueven más rápido que la onda. Alcanzan a la onda, se unen a ella durante un cierto período de tiempo y terminan por abandonarla. Las estrellas de las regiones exteriores de la galaxia, en cambio, son más lentas que la onda, que las alcanza por detrás y acaba por superarlas. El círculo de corrotación define la frontera entre las dos regiones. La longitud de los brazos espirales viene fijada por otros dos círculos, que marcan las posiciones de las resonancias de Lindblad, donde la onda y las estrellas se mueven en fase.



LA VELOCIDAD ANGULAR de la onda es constante en toda la galaxia, mientras que la velocidad orbital de las estrellas disminuye con la distancia al centro. Las dos velocidades son idénticas en el círculo de corrotación. Las órbitas de las estrellas no están fijas en el espacio; también giran. Allí donde el ritmo de rotación iguala a la velocidad de la onda se encuentran las resonancias de Lindblad. (Para mayor claridad, la gráfica muestra sólo una resonancia.)



La onda se mueve en el sentido de las agujas del reloj (*de abajo arriba y de derecha a izquierda en este recuadro*). También las estrellas.

Las estrellas interiores (*naranja*) se mueven más deprisa que la onda; las estrellas exteriores (*azul*), más despacio.

DON DIXON (*ilustraciones*); ALISON KENDALL (*gráfica*)

En medio existe un círculo de corrotación, donde la onda acompaña a las estrellas a la misma velocidad.

Además del círculo de corrotación, hay otras dos regiones especiales en el disco: una en su interior y otra en el exterior. Se trata de las resonancias de Lindblad, así llamadas en honor de su descubridor, Bertil Lindblad. Las estrellas que orbitan en estas regiones tienen una cierta sincronización con la onda: cada vez que alcanzan a la onda o ésta les da alcance a ellas se encuentran en determinado punto de sus órbitas. Esta coincidencia refuerza el suave empuje ejercido por la onda sobre la estrella. Las resonancias de Lindblad y otras resonancias desempeñan una función importante en la forma de las órbitas y en la delimitación de las ondas de densidad. Procesos similares constituyen los anillos planetarios.

La teoría de las ondas de densidad explica por qué subsisten las estructuras espirales y las barras. Pero poco después de que Lin y Shu la propusieran empezó a tener problemas. Alar Toomre, del Instituto Tecnológico de Massachusetts, observó que las ondas de densidad pierden energía al producir ondas de choque en el medio interestelar. Algo debe revitalizarlas. En un principio se pensó que podrían actuar propagaciones de ondas más complejas. En lugar de una única onda barriendo la galaxia, muchas ondas podrían desplazarse hacia dentro y hacia fuera. El círculo de corrotación haría de interfaz, que lo mismo reflejaría que transmitiría las ondas y propiciaría que éstas ganasen energía a expensas de la energía rotacional global de la galaxia. Las ondas se amplificarían al propagarse por la región central, convertida en una cámara resonante cósmica.

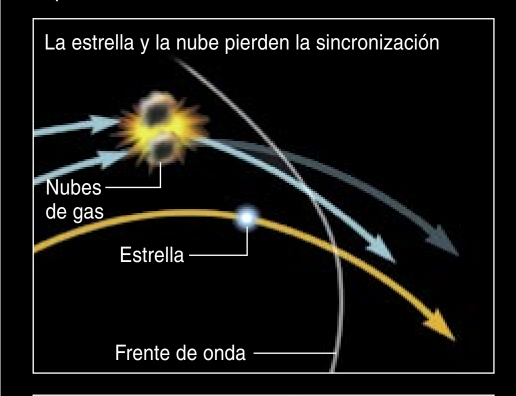
Aunque este mecanismo complejo de amplificación y reflexión de las ondas parecía una hipótesis verosímil, pero las ecuaciones resultaban demasiado complicadas para solucionarlas con exactitud excepto si se aplicaban aproximaciones drásticas. Se recurrió a efectuar simulaciones numéricas por ordenador, tarea nada fácil en aquella época en que se utilizaban tarjetas perforadas. Los primeros cálculos apuntaron a que la existencia de un complejo ondulatorio, lejos de preservar la estructura espiral, aceleraba su destrucción. Se desarrollaría primero una estructura espiral, pero decaería con rapidez, dejando tras de sí una barra. Los teóricos no hallaron ninguna forma de que no se creara la barra sin entrar en contradicción con las observaciones y, por tanto, no pudieron explicar la existencia de galaxias que carecen de esa estructura.

Esta situación insatisfactoria cambió por completo en los años ochenta y noventa al incluir mis colaboradores y yo otro ingrediente en las simulaciones: el gas. Puesto que el gas representa sólo unas centésimas de la masa total de las galaxias espirales, los modeladores lo habían despreciado con el fin de hacer las simulaciones más manejables. Pero el gas desempeña un papel dinámico desproporcionado. Las nubes de gas interestelar chocan con frecuencia y convierten su energía cinética en ondas de choque y en radiación. Con su velocidad así atemperada, las nubes son más propensas a las inestabilidades ondulatorias. Las estrellas, por el contrario, casi nunca colisionan, por lo que mantienen un amplio rango de velocidades relativas y oponen una mayor resistencia al paso de las ondas.

En cuanto se incluye gas, las simulaciones proporcionan una rica variedad de morfologías galácticas. El par ejercido por la barra estelar actúa a la manera de un agitador enorme, que promueve sin cesar una estructura espiral en el gas. La espiral no desaparece como ocurría en las simulaciones anteriores. Es más, las ondas ricas en gas solventaron otros problemas de la astronomía galáctica. Así, explican la presencia de líneas de polvo en el borde anterior de los brazos espirales. Debido a las colisiones, el gas (mezclado con polvo) no está en fase con las estrellas: pierde

EL GAS Y LAS ESTRELLAS

Las ondas galácticas resultan un proceso esencial para la redistribución del gas interestelar dentro de la galaxia y, por lo tanto, para que se formen estrellas. La clave del proceso reside en el diferente modo en que estrellas y nubes de gas responden a la onda.



SI UNA ESTRELLA Y UNA NUBE empiezan en órbitas similares, la estrella seguirá su camino, pero la nube —en virtud de su gran tamaño— no podrá evitar encontrarse con otras nubes, perder con ello energía y trasladarse a una órbita más pequeña. Por eso, una onda galáctica no puede colocar a las estrellas y nubes de gas en perfecta sincronía.



EL DESEQUILIBRIO ENTRE LAS FUERZAS, resultado de la falta de sincronización entre nubes y estrellas, provoca una tendencia a girar en las nubes. Una nube interior al círculo de corrotación se mueve más deprisa que las estrellas de la barra central, pero la gravedad de éstas la atrae, le roba energía orbital y momento angular, y provoca su caída hacia dentro. Una nube exterior al círculo es atraída hacia fuera, lo que le añade energía orbital y momento angular, siendo arrastrada a una órbita mayor.

DON DIXON

energía orbital, se precipita hacia el centro y adelanta a las estrellas en los brazos espirales (*véase el recuadro* “El gas y las estrellas”).

La disipación de energía envía el gas hacia el centro en el plazo de unas pocas rotaciones de la barra, es decir, en unos mil millones de años. Allí, el gas forma nuevas estrellas. Por tanto, las ondas explican el alto y constante ritmo de formación estelar en los centros galácticos. Podrían incluso resolver el misterio de la alimentación de los agujeros negros centrales. Aportar material a un agujero negro no es tan sencillo como podría imaginarse. Aunque una galaxia tiende a minimizar su energía potencial gravitatoria y concentrar la masa en el centro, la rotación y las correspondientes fuerzas centrífugas contrarrestan la gravedad. Cuando la materia se precipita hacia el interior, la galaxia instada por pares de escala galáctica, pierde momento angular, transferido a otro punto. Las barras y las espirales actuarían precisamente así.

Se ha visto que el gas se precipita hacia los agujeros negros a grandes ráfagas. Las ondas los alimentan en dos pasos. Primero, el gas desciende hasta alcanzar una resonancia donde entra en fase con la barra y, por lo tanto, permanece inmune al efecto del par ejercido por ésta. El gas se acumula en un anillo y da lugar al nacimiento de estrellas. En un segundo paso, el gas y las estrellas del anillo forman su propia onda barrada. Esta minibarra arroja gas hacia el agujero negro. Las observaciones en el infrarrojo cercano dan a entender que en nuestra galaxia existe esa minibarra, inserta en la barra central; gira mucho más deprisa. Las ondas no sólo decoran; la galaxia crece gracias a ellas.

Sin barras

Según las simulaciones tridimensionales, la barra no sólo impulsa materia lateralmente por el disco; también la eleva fuera de éste. Una estrella puede entrar en una resonancia tal con la onda barrada, que sus oscilaciones verticales y los encuentros con la barra sucedan al mismo ritmo (o múltiplo de él). La barra amplificará entonces las oscilaciones, como quien balancea a un niño en un columpio.

UNA GALAXIA SE REINVENTA: SIMULACION INFORMATICA

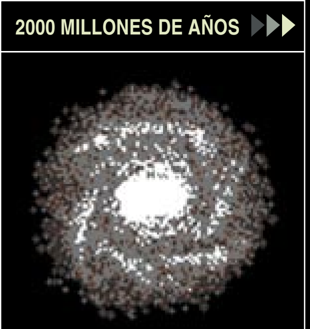
Se creía que las barras y las espirales eran rasgos permanentes de una galaxia. Ahora se sabe que aparecen y desaparecen. Los procesos gravitatorios que provocan la destrucción de la barra vuelven después a crearla de nuevo.

COMIENZO



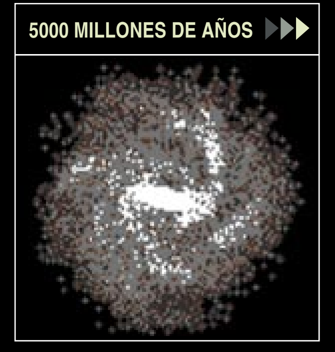
La galaxia nace en forma de disco amorfo de estrellas, gas y polvo.

2000 MILLONES DE AÑOS



Se desarrollan la barra y las ondas espirales. El gas va cayendo desde el espacio intergaláctico sobre el disco; en unos 6500 millones de años terminará por doblar la masa del disco.

5000 MILLONES DE AÑOS



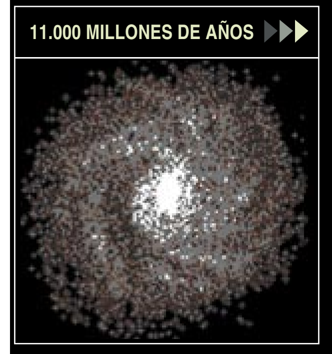
Las ondas ganan fuerza. La barra arroja gas hacia el núcleo, pero mantiene el gas intergaláctico a distancia.

8000 MILLONES DE AÑOS



El gas acumulado en el núcleo empieza a destruir la barra.

11.000 MILLONES DE AÑOS



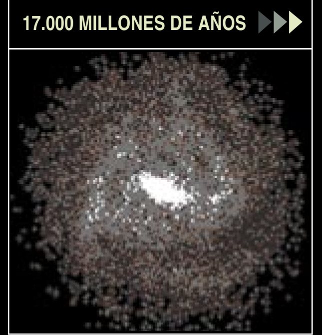
La barra ha desaparecido. Nada retiene al gas intergaláctico y cae en el núcleo de la galaxia.

14.000 MILLONES DE AÑOS



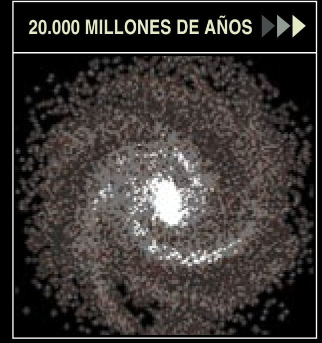
Reaparece la barra. La caída de gas es crucial: en las simulaciones que no tienen en cuenta este fenómeno, la barra, una vez destruida, nunca vuelve a aparecer.

17.000 MILLONES DE AÑOS



Igual que antes, la barra comienza a desvanecerse.

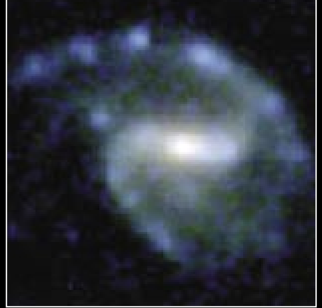
20.000 MILLONES DE AÑOS



La barra casi ha desaparecido de nuevo. En simulaciones con condiciones diferentes, las barras se forman y desvanecen con mayor rapidez.

ALISON KENDALL






2. LAS GALAXIAS LEJANAS, que representan una época temprana de la historia cósmica, manifiestan las mismas estructuras básicas —barras y espirales— que las galaxias más cercanas. Se refuerza así la idea de que estas formas se han generado por procesos internos ondulatorios. Estas galaxias son tan distantes, que resulta difícil apreciar el detalle de sus estructuras; de ahí que haya habido diferencias entre los astrónomos acerca de la abundancia relativa de las diversas conformaciones galácticas.

Dimos con este fenómeno casi fortuitamente, durante unas simulaciones tridimensionales. El disco de estrellas se ensancha bastante en la región de resonancia; el interior de la galaxia toma así forma de cacahuete. Estos descubrimientos explicarían las extrañas estructuras que los telescopios vienen observando desde hace más de diez años.

Pero al arrojar materia al núcleo de una galaxia, la barra puede destruirse a sí misma. La masa acumulada dispersa las estrellas y les impide orbitar regularmente, tal y como necesita la barra. Las barras, que parecen tan robustas cuando sólo se considera la componente estelar, se vuelven muy frágiles cuando se tiene en cuenta el gas. En tal caso, ¿por qué se observan tantas galaxias barradas? En las imágenes ópticas, alrededor de dos terceras partes de las galaxias presentan barras, y las exploraciones en el infrarrojo cercano del año 2002 llevaron la cuenta hasta las tres cuartas partes. La conclusión lógica es que las barras se forman, desaparecen y se generan de nuevo en un ciclo continuo.

No resulta sencillo encontrar una explicación de cómo se vuelven a formar las barras. La galaxia tiene que evolucionar mucho, alejándose de las condiciones que destruyeron la barra. En concreto, las órbitas han de recuperar su regularidad, con velocidades bajas. Podría ocurrir mediante la captura de grandes cantidades de gas intergaláctico. Cuando las nubes de gas caen hacia la galaxia, colisionan, pierden así energía y regularizan sus órbitas. Su alto momento angular inicial frena el descenso y da una oportunidad a la barra de reagruparse. La cantidad de gas necesaria para este proceso es enorme: para que las barras vuelvan a formarse con la frecuencia adecuada, una galaxia corriente debe doblar su masa en unos 10.000 millones de años. Hoy se sabe que el espacio intergaláctico tiene reservas de tal magnitud.

Para comprobar este modelo debemos mirar atrás en el tiempo. El telescopio espacial Hubble tiene resolución suficiente para distinguir la forma de las primeras generaciones de galaxias. El primer intento, llevado a cabo entre 1998 y 2002 por Sidney van den Bergh, del Instituto Herzberg de Astrofísica en Victoria, y sus colaboradores, llegó a la conclusión de que las barras fueron en el pasado menos frecuentes que hoy en día. Este resultado sorprendió; arrojaba dudas no sólo sobre el modelo de caída de gas, sino sobre toda la teoría de las ondas barradas. Las primeras galaxias eran más gaseosas y menos concentradas en el centro; las barras deberían haber sido más comunes. El grupo de Shardha Jogee, de la Universidad de Texas en Austin, ha corregido recientemente los resultados de Van der Bergh. Les afecta un sesgo observacional: cuesta más reconocer las barras en las galaxias lejanas. Al tener en cuenta este efecto, se obtiene que las barras abundaban en el pasado tanto como en el presente; parece que se destruyen y reconstruyen a un ritmo constante.

En resumen, las galaxias no nacen con una forma determinada, barradas o sin barras. Se metamorfosean. Si tres cuartas partes de las galaxias son barradas, una galaxia típica debe pasar tres cuartas partes de su vida con una barra. Durante ese tiempo, la barra impide que el gas penetre en la región central de la galaxia. El gas se acumula en una región exterior y, tras la autodestrucción de la barra, entra y rejuvenece la galaxia.

Hay otra manera, más conocida que la anterior, de que una galaxia acumule masa: el canibalismo, las fusiones galácticas sucesivas. Este proceso, aunque también muy importante, es destructivo. Una fusión gigante destruye el disco y deja tras de sí una galaxia elíptica. Sólo una pequeña fracción de las galaxias ha sufrido una transformación tan radical. La captura lenta y suave de gas procedente del espacio intergaláctico permite que las galaxias crezcan y se desarrollen manteniendo intacta su estructura. Las ondas redistribuyen el nuevo material capturado e impiden que las galaxias se vayan apagando poco a poco. Gracias a las ondas siguen siendo vibrantes.

La autora

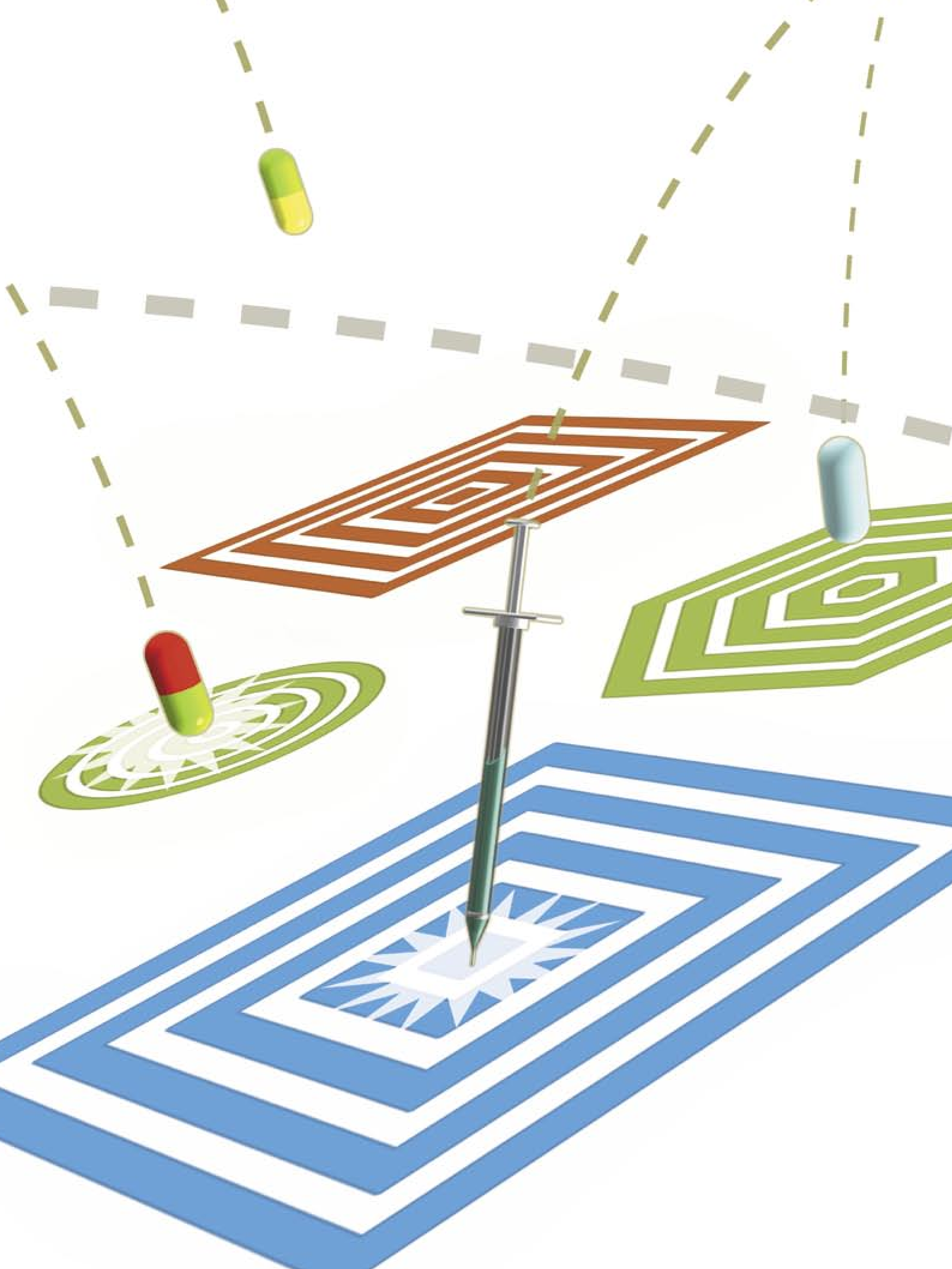
Françoise Combes, del Observatorio de París, preside el Comité Nacional Francés de Astronomía.

Bibliografía complementaria

GAS ACCRETION ON SPIRAL GALAXIES: BAR FORMATION AND RENEWAL. Fréderic Bournaud y Françoise Combes en *Astronomy & Astrophysics*, vol. 392, n.º 1, págs. 83-102; septiembre 2002.

REDESIGNING THE MILKY WAY. William H. Waller en *Sky and Telescope*, vol. 108, n.º 3, págs. 50-56; septiembre 2004.

SECULAR EVOLUTION VERSUS HIERARCHICAL MERGING. Françoise Combes en *Penetrating Bars through Masks of Cosmic Dust*. Dirigido por D. L. Block, I. Puerari, K. C. Freeman, R. Groess, E. K. Block. Springer, 2004.

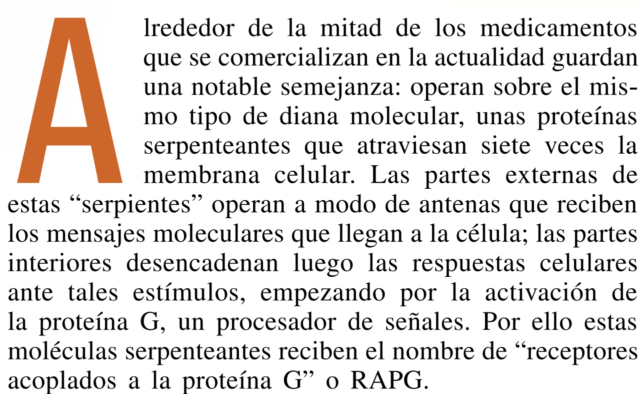


Nuevas dianas farmacológicas

El descubrimiento de nuevas formas de modificar la actividad de unos conocidos receptores de la superficie celular amplía el panorama del desarrollo de fármacos

Terry Kenakin



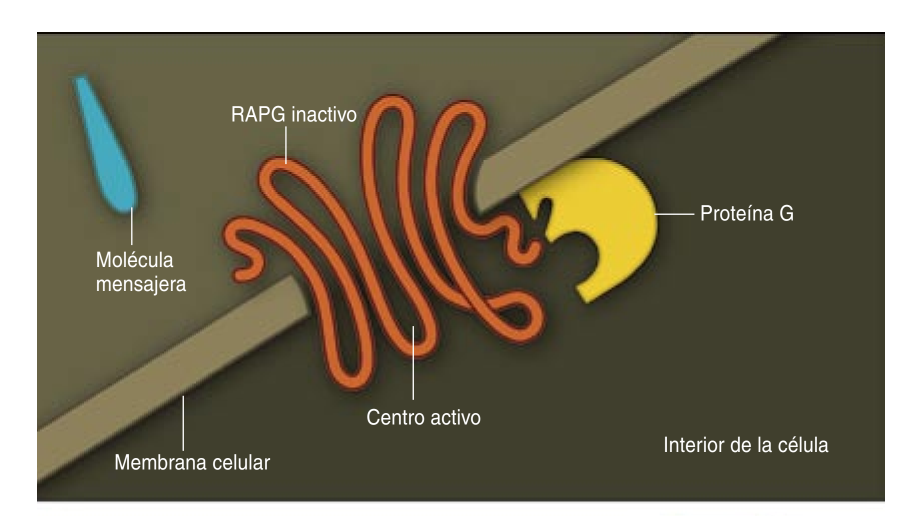


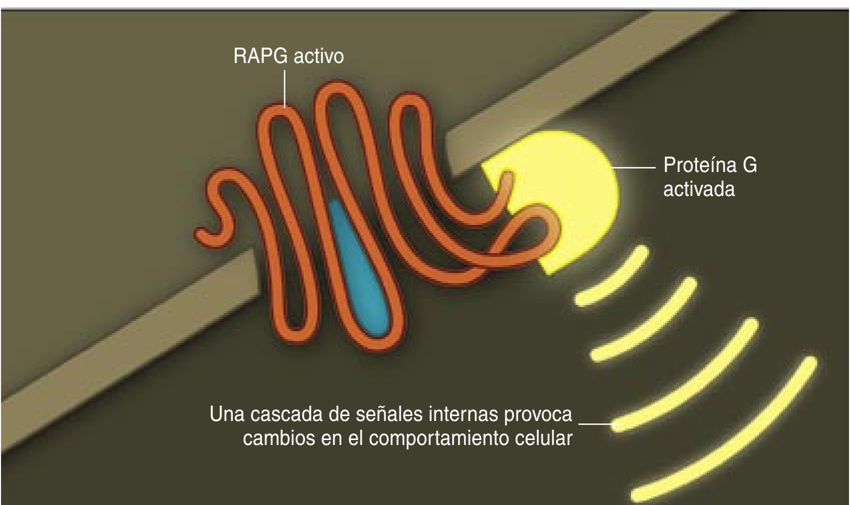
GIACOMO MARCHESI

Alrededor de la mitad de los medicamentos que se comercializan en la actualidad guardan una notable semejanza: operan sobre el mismo tipo de diana molecular, unas proteínas serpenteantes que atraviesan siete veces la membrana celular. Las partes externas de estas "serpientes" operan a modo de antenas que reciben los mensajes moleculares que llegan a la célula; las partes interiores desencadenan luego las respuestas celulares ante tales estímulos, empezando por la activación de la proteína G, un procesador de señales. Por ello estas moléculas serpenteantes reciben el nombre de "receptores acoplados a la proteína G" o RAPG.

Los RAPG muestran mayor versatilidad que cualquier otro tipo de receptores celulares. Por ejemplo, el tamaño de las moléculas a las que responden oscila entre el de neurotransmisores que ocupan poco más que un átomo de carbono y el de proteínas 75 veces mayores. Asimismo, intervienen en casi todas las funciones vitales para el organismo: desde el latido cardiaco y la digestión hasta la respiración y la actividad cerebral. La diversidad afecta también a los fármacos que operan sobre estos receptores. La lista incluye reductores de la presión sanguínea (propranolol), neutralizadores de la acidez gástrica (ranitidina), broncodilatadores (albuterol) y antidepresivos (paroxetina). Se utilizan en el tratamiento de la hipertensión, la insuficiencia cardiaca congestiva, úlceras, asma, ansiedad, alergias, cáncer, migrañas y la enfermedad de Parkinson, entre otros trastornos.

Aunque resulte increíble, todos los fármacos que operan sobre los receptores acoplados a la proteína G lo hacen de una de estas dos maneras: o bien se unen al centro activo ("antena") del receptor, remedando así el efecto de neurotransmisores, hormonas u otros de los mensajeros naturales, o bien se interponen en la operación de estos mensajeros sobre el centro activo.





LOS RECEPTORES ACOPLADOS A LAS PROTEINAS G (RAPG) atraviesan la membrana celular siete veces. En general, emiten señales hacia el interior de la célula (*arriba*) sólo cuando una hormona, un neurotransmisor u otra molécula mensajera se une a su centro activo. Esta unión (*abajo*) provoca la activación de una proteína G, que desencadena una cascada de señales internas que culminan en un cambio en el comportamiento de la célula. Nuevos descubrimientos sobre el funcionamiento de los RAPG abren nuevas vías para el desarrollo de fármacos.

Merced a la revolución técnica de los quince últimos años, disponemos ahora de nuevas herramientas para ahondar en el modo de operación de los RAPG. Fruto de ese avance, se conocen otras formas de controlar la actividad de tales receptores, que se están empezando a explorar con la mirada puesta en el descubrimiento de nuevos fármacos. En otras palabras, pese a que las medicinas que operan sobre los RAPG abundan en el mercado actual, podría haber en camino muchas más. En su mayoría se encuentran todavía en las etapas preliminares de su desarrollo; pero algunas (agentes que combaten la infección por VIH) han llegado ya a la fase de ensayos clínicos.

Alosterismo

Hasta hace unos diez años, se creía que para modificar la actividad de un receptor acoplado a la proteína G debían dirigirse los fármacos hacia el centro activo del mismo. Los neurotransmisores u otras moléculas portadoras de información (o ligandos) que llegan a la célula se introducen, a modo de "llave", en la "cerradura" del centro activo del RAPG. Por tanto, una sustancia que taponara esa cerradura evitaría la transmisión de señales a través del receptor (cualquiera que fuera el mensajero): operaría como un inhibidor. En cambio, una sustancia que remedara al ligando natural abriría la cerradura: realizaría la función de llave.

Se creía también que para instar una respuesta fisiológica determinada debía seleccionarse un compuesto que interactuase con una variedad concreta de receptor e ignorara otras. La noradrenalina (un neurotransmisor), por ejemplo, activa dos tipos de RAPG, los adrenorreceptores alfa y beta, de los cuales el primero presenta cuatro subtipos y el segundo tres. A su vez, estos receptores gobiernan varios procesos vitales: en el corazón, los adrenorreceptores $beta_1$ aceleran el ritmo cardiaco e incrementan la fuerza de cada latido; en los pulmones, los adrenorreceptores $beta_2$ ensanchan las vías respiratorias. Por tanto, para despejar las vías respiratorias constreñidas sin provocar efectos secundarios en el corazón, debería hallarse una sustancia que imitara la capacidad de la noradrenalina para estimular a los adrenorreceptores $beta_2$ y no se uniera a los adrenorreceptores $beta_1$.

De hecho, un gran número de medicamentos actúan como inhibidores o agonistas (análogos) mediante la interacción con el centro activo de un

Resumen/Nuevas dianas farmacológicas

- Los receptores acoplados a las proteínas G (RAPG) residen en la superficie celular y transmiten señales, procedentes de hormonas y otras moléculas mensajeras, hacia el interior de la célula mediante la activación de las proteínas G, procesadores de señales localizados justo debajo de la membrana celular.
- Cerca de la mitad de los fármacos del mercado actúan sobre los RAPG. Operan mediante la unión a los sitios donde suelen dirigirse las moléculas mensajeras extracelulares del propio organismo.
- En el curso de los diez últimos años, se ha descubierto que la actividad de los RAPG se modifica también mediante la unión a otras regiones del receptor. Ello abre nuevas vías terapéuticas.

JEN CHRISTIANSEN

RAPG específico. En la actualidad, sin embargo, está emergiendo una estrategia farmacológica que saca provecho de la naturaleza alostérica de los receptores acoplados a la proteína G, es decir, del hecho de que la forma de una región del receptor afecte a la conformación (y, por tanto, a la actividad) de otra región distante.

Los RAPG cambian de conformación constantemente. Los mensajeros se unen al centro activo, estabilizando la estructura que activa a las proteínas G. Los moduladores alostéricos, en cambio, se unen a otra región del RAPG, de manera que modifican la conformación y la actividad del mismo. Algunos estabilizan las conformaciones que promueven la transmisión de señales; otros mantienen estructuras que la impiden (por ejemplo, mediante el bloqueo del centro activo, tornándolo inaccesible para su ligando natural).

Esta propiedad alostérica entraña un enorme potencial farmacológico, pues el receptor ofrece varios puntos de unión a los que una molécula diminuta podría enlazarse y estabilizar así una conformación que provocase algún efecto biológico. Se amplía con ello el panorama de la modificación funcional terapéutica de los RAPG.

Entre quienes se afanan por ahondar en las posibilidades que encierran los moduladores alostéricos se encuentran los expertos en sida. Centran su búsqueda en moduladores que eviten la infección por VIH. Desde hace tiempo se sabe que el virus ataca a los linfocitos T coadyuvantes mediante la unión a CD4, una proteína de la superficie celular. Sin embargo, a mediados de los años noventa del siglo pasado se descubrió que esta proteína no operaba sola.

Para introducirse en la célula, el virus se une también a otro punto de anclaje: el CCR5 (un receptor acoplado a la proteína G) o, en las fases tardías de la infección, al CXCR4. El CCR5 responde a cualquiera de tres quimiocinas, mensajeros que atraen a las células del sistema inmunitario al lugar de la infección. Por desgracia, ofrece también un punto de anclaje para gp120, la proteína de la cápside del VIH. De hecho, parece que CCR5 desempeña una función crucial en la infección: los individuos que carecen de una versión operativa del receptor tienden a oponer una notable resistencia al VIH.

Varios moduladores alostéricos que mantienen el CCR5 en una conformación que no favorece su unión a la gp120 del VIH se hallan ya en fase de ensayos clínicos. Bloquear la interacción gp120-CCR5 mediante estos minúsculos fármacos equivaldría, en términos geofísicos, a impedir la unión de dos continentes del tamaño de Australia mediante las islas Fidji. O, en una versión más alegórica, estos medicamentos vendrían a ser el David que derrotara a Goliat.

Complejidad funcional

Los efectos producidos por los receptores acoplados a la proteína G no dependen sólo de las moléculas que se les unen, sino también del número de ellos que se encuentren accesibles en la superficie celular. Como cabría esperar, cuando los mensajeros extracelulares se unen a varias copias de un receptor, la célula recibe una señal más “estruendosa” y sufre un cambio de comportamiento más pronunciado que cuando el número de receptores activados es menor. Pero la “intensidad” de la activación controla algo más que “el volumen” de la señal: determina también cuál de entre una serie de proteínas G resulta estimulada y, por tanto, qué rutas (cascadas de interacciones moleculares) se activan en el interior de la célula.

Se distinguen cuatro clases principales de proteínas G, cada una con varios subtipos. Cada clase muestra propensión a operar con un determinado receptor acoplado a la proteína G; a su vez, no todos los RAPG presentan la misma actividad frente a todas las proteínas G. Así, la escasez de un receptor determinado daría lugar a la activación de sólo la proteína G más sensible, mientras que la abundancia de ese mismo receptor produciría respuestas en múltiples proteínas G, provocando un comportamiento celular distinto.

Un RAPG no constituye, pues, un simple interruptor que se enciende ante la presencia de una hormona o un neurotransmisor y se apaga cuando el mensajero se aleja de su centro activo. Se trata de un centro de procesamiento de información harto más complejo.

La variedad de respuestas que un RAPG genera parece que depende de

FARMACOS QUE OPERAN SOBRE LOS RAPG

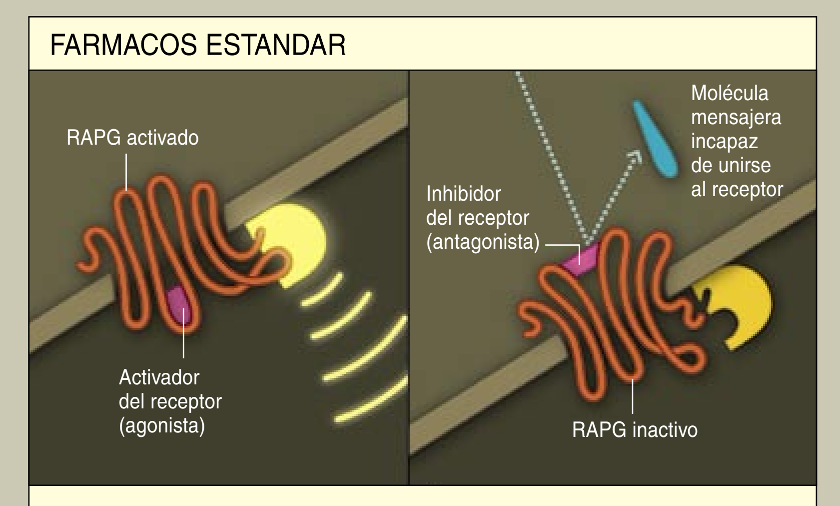
Esta lista ofrece sólo una muestra del extenso elenco de sustancias que se encuentran en el mercado. Operan sobre varios RAPG.

NOMBRE COMERCIAL (GENERICO) Y FABRICANTE	EFECTO
Allegra (fexofenadina) *Aventis*	Antihistamínico; controla respuestas alérgicas
Duragesic (fentanilo) *Janssen*	Analgésico
Flomax (tamsulosina) *Boehringer Ingelheim*	Alivia los síntomas de la hipertrofia benigna de próstata
Imitrex (sumatriptán) *GlaxoSmithKline*	Alivia la migraña
Lopressor (metoprolol) *Novartis*	Reduce la presión sanguínea
Oxycontin (oxycodona) *Purdue*	Analgésico
Pepcid (famotidina) *Merck*	Neutraliza la acidez gástrica
Fenergan (prometacina) *Wyeth*	Antihistamínico
Serevent (salmeterol) *GlaxoSmithKline*	Despeja las vías respiratorias
Singulair (montelukast) *Merck*	Controla la inflamación de las vías respiratorias
Sudafed (pseudoefedrina) *Pfizer*	Alivia la congestión nasal
Zantac (ranitidina) *GlaxoSmithKline*	Neutraliza la acidez gástrica
Zyrtec (cetirizina) *Pfizer*	Antihistamínico
Zyprexa (olanzapina) *Eli Lilly*	Alivia los síntomas de diversas psicosis

VIAS DE ATAQUE

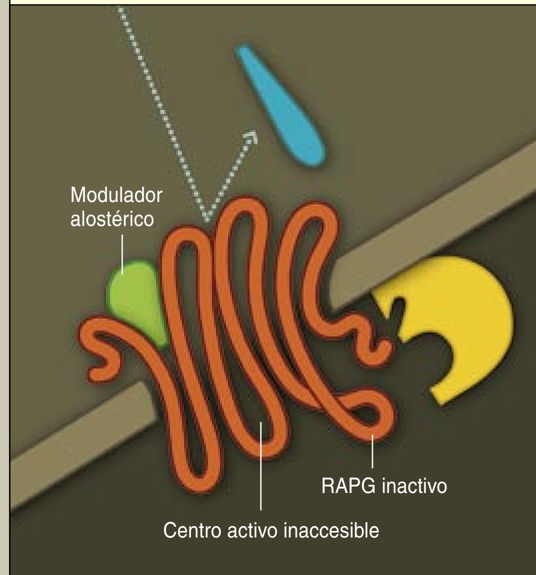
La mayoría de los fármacos del mercado se dirigen hacia el centro activo de algún receptor de la superficie celular; muchos apuntan hacia el centro activo de un RAPG específico (*abajo*). Sin embargo, la actividad de un RAPG se modifica también mediante la unión a otras regiones del mismo (*derecha*). Descubrimientos recientes sugieren que moléculas de tamaño reducido dirigidas hacia esos puntos de ataque activarían o inhibirían los RAPG implicados en varias enfermedades.

FARMACOS ESTANDAR



Estos fármacos suelen operar mediante la unión al centro activo del RAPG; con ello remedan la acción de una molécula mensajera natural (*izquierda*) o impiden que el mensajero natural se acople al receptor y, por tanto, actúe sobre la célula (*derecha*).

MODULADORES ALOSTERICOS



Estos agentes estabilizan la conformación de un RAPG de forma que aumenta (*no se muestra*) o disminuye (*arriba*) la actividad del receptor, por ejemplo, haciendo que el centro activo se torne inaccesible para las moléculas mensajeras.

JEN CHRISTIANSEN

la gama de ligandos que detecta, así como de la combinación de proteínas G que activa. Si, por ejemplo, un receptor detecta tres mensajeros distintos y activa una, dos, tres o las cuatro proteínas G mayoritarias (éste es el caso del RAPG que responde a la tirotropina, la hormona pituitaria que estimula la glándula tiroidea), éste adquiere la capacidad de adoptar docenas de comportamientos distintos. Si se tratara de un simple "interruptor", adoptaría sólo dos.

Los expertos sugieren que esta complejidad funcional abre nuevas vías de acción farmacológica. Distintas sustancias podrían hacer que un receptor adoptara diferentes conformaciones activas, cada una de las cuales interaccionaría con una proteína G, o una combinación de proteínas G, distinta, desencadenando cascadas de procesos intracelulares divergentes. También resultarían provechosos los agentes que, en vez de alterar la actividad de los RAPG, aumentaran o disminuyeran la cantidad de receptores presentes en la superficie celular.

Se aplicarían, por ejemplo, en la lucha contra el VIH. Sin embargo, los moduladores alostéricos diseñados para impedir la unión de la proteína de la cápside vírica al CCR5 topan con una dificultad: la presta mutación del virus. Semejante mutabilidad podría dar lugar a una proteína capaz de unirse al CCR5 alterado por alosterismo. Esta amenaza se eludiría entonces mediante la eliminación del receptor de la superficie celular, privando al virus de su vía de ataque.

Lo mismo que todos los RAPG, el CCR5 se sintetiza en la célula de forma continua: se emplaza en la superficie y luego se devuelve al interior para su reciclaje o degradación. Determinadas quimiocinas promueven la interiorización del CCR5. Ello abre la posibilidad de desarrollar fármacos que acelerarían la eliminación del CCR5 de la superficie celular y, por tanto, impedirían que el VIH se adaptara al receptor (por mucho que mutara, el virus no tendría forma de unirse al CCR5, si dicho receptor no se hallara en la superficie celular).

Receptores rebeldes

Amén del alosterismo, los RAPG manifiestan otro comportamiento de interés biológico: la "actividad constitutiva" (o "independencia de agonista"), es decir, la capacidad de activar a proteínas G, aun cuando ningún ligando (mensajero) se les ha unido para "decirles" que lo hagan. Este comportamiento, igual que otros aspectos de la actividad de tales receptores, se halla vinculado a una conformación particular. Sin embargo, se trata de una conformación poco frecuente, por lo que apenas repercute en el comportamiento global de la célula y es de difícil detección. Ahora bien, si el número de receptores que manifiestan actividad constitutiva es elevado, se produce un poderoso efecto conjunto de todas las señales.

Las consecuencias adquieren particular gravedad en las infecciones víricas y el cáncer, que podrían progresar si se provocara que algún receptor se comportara un modo conforme con el asentamiento de la enfermedad. En cierto tipo de cáncer pancreático, el receptor del péptido

INDUCTORES DE LA INTERIORIZACION

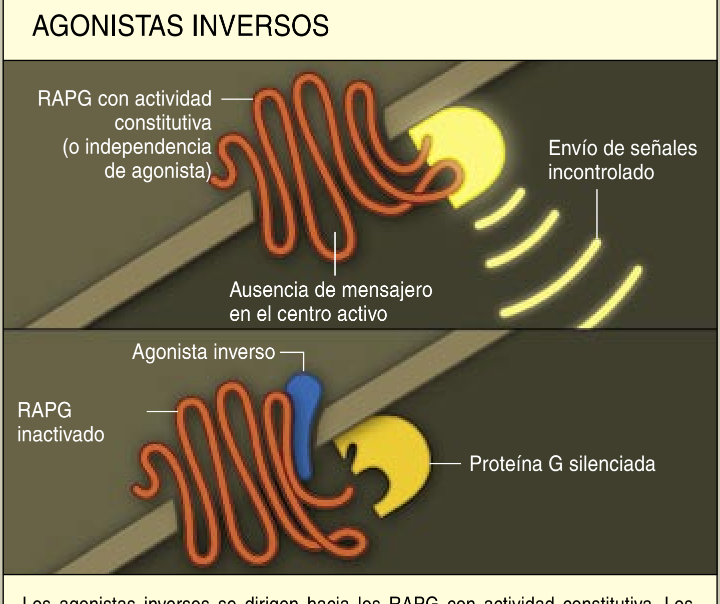
Inductor de la interiorización

Molécula mensajera privada del acceso a su objetivo

La célula absorbe el receptor

RAPG interiorizado

Los inductores de la interiorización hacen que los receptores abandonen la superficie celular. Bloquean así el envío de señales al interior de la célula.



Los agonistas inversos se dirigen hacia los RAPG con actividad constitutiva. Los receptores yerran entonces su comportamiento: operan como si estuviesen unidos a una sustancia estimulante, aun cuando no lo estén (*arriba*). El anclaje del agonista inverso interrumpe el envío de señales (*abajo*). Las células cancerosas presentan a menudo un elevado número de receptores con actividad constitutiva que potenciarían la división celular incontrolada; los agonistas inversos, pues, abrirían nuevas vías terapéuticas contra el cáncer.

vasoactivo intestinal (PVI, una hormona), podría tornarse perjudicial.

En una célula pancreática sana que presente este RAPG, la activación del receptor mediante la PVI estimula la división celular. Pero las personas que padecen la enfermedad mencionada cuentan con un exceso de estos receptores; así, las versiones del mismo con actividad constitutiva (independientes de la PVI) llegan a ser tan numerosas, que impulsan la proliferación descontrolada de células tumorales. Se sabe desde hace tiempo que algunos receptores no acoplados a las proteínas G, en particular el Ras, presentan una actividad constitutiva de carácter destructivo. Sin embargo, en esos casos este comportamiento no se debe a una abundancia anormal de receptores, sino a la presencia de mutaciones en el receptor.

Los fármacos al uso no logran sofocar las alteraciones que la actividad constitutiva provoca en el comportamiento celular. Un estimulador de receptores, o agonista, conseguiría sólo aumentar el número de receptores con conformación activa, en detrimento del paciente. Un inhibidor de receptores, o antagonista, podría impedir que los mensajeros naturales activaran los receptores, pero no ejercería ningún efecto sobre aquellos con independencia de agonista. Se requiere, por tanto, un nuevo tipo de fármacos que fuercen a los RAPG con actividad constitutiva a mantener una conformación inactiva.

Algún día, estos agentes, los agonistas inversos, podrían abrir una nueva vía terapéutica contra el cáncer. Quizá resulten eficaces también en el tratamiento de la obesidad. En este ámbito, se contemplan dos posibles dianas: el receptor de la grelina (hormona que se produce sobre todo en el estómago) y el subtipo H_3 del receptor de la histamina; ambos parecen intervenir en el control cerebral del apetito.

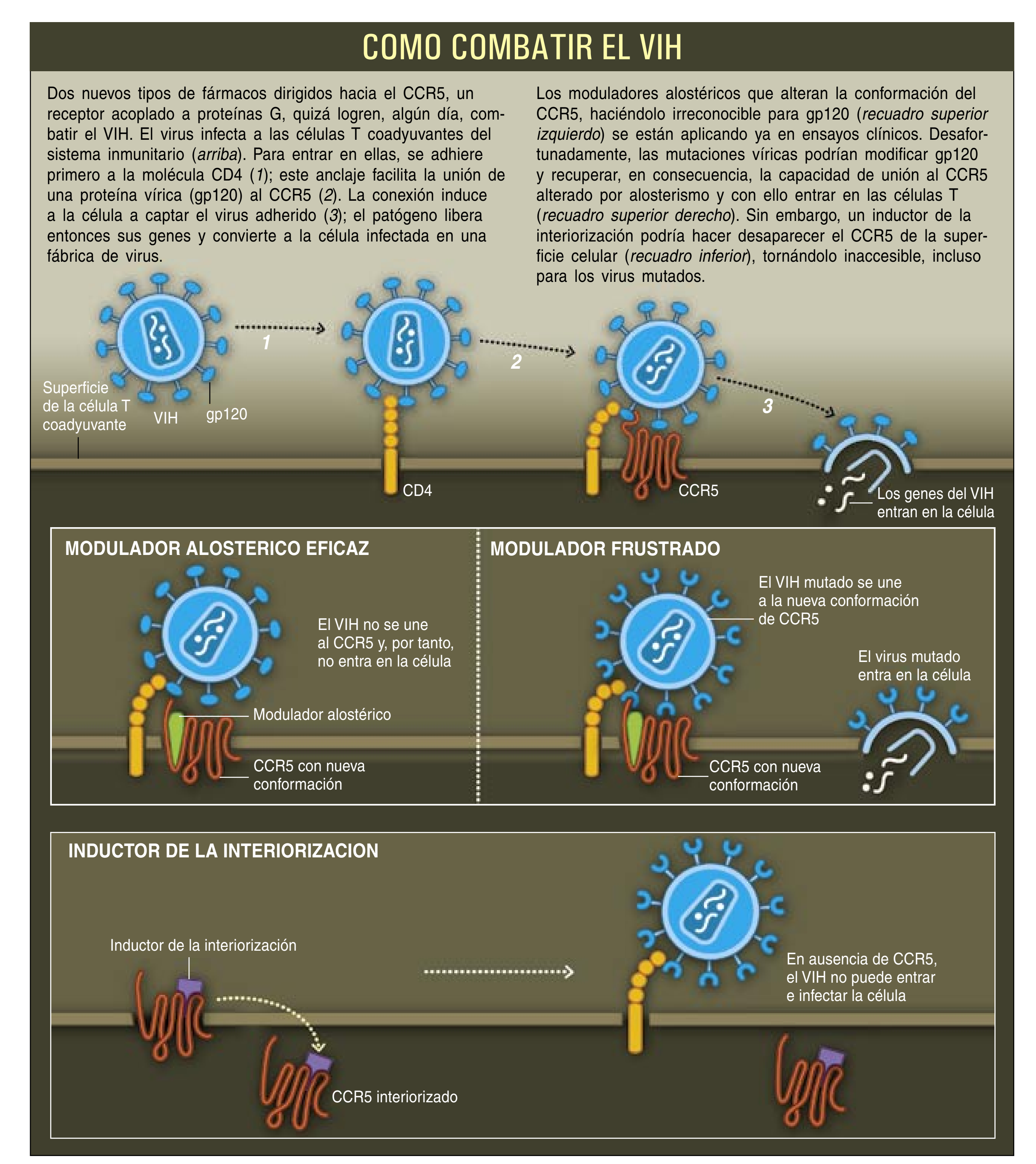
Coproteínas y receptores complejos

Además de los comportamientos mencionados hasta ahora, los RAPG muestran al menos otro que podría resultar útil para el desarrollo de fármacos. En ocasiones, las células mezclan y emparejan proteínas, formando complejos que operan como receptores y que muestran una sensibilidad de la que carecen los componentes individuales. En el caso más extremo, la célula adquiere capacidad de respuesta frente a una señal que, en condiciones normales, ignoraría. Las instrucciones que dirigen la síntesis de una proteína residen en genes específicos. Para la fabricación de estos receptores combinados, en cambio, no existe un plano concreto (a partir del cual podrían predecirse sus comportamientos); por ello se les considera productos de genes “fantasma”.

En algunos casos, el receptor complejo consta de dos o más RAPG. En otros, incluye un RAPG y una coproteína (una molécula que no constituye, en sí, un receptor pero que confiere al receptor nuevos atributos). El receptor para la amilina (una hormona) parece ser de este tipo. Liberada por las mismas células pancreáticas que secretan la insulina, la amilina modula los efectos de la insulina sobre otras células. Sin embargo, no se ha logrado identificar ninguna proteína que opere como

su receptor. Tampoco el análisis de la secuencia del genoma humano ha revelado la existencia de ningún gen para el supuesto receptor. En cambio, un complejo formado por el RAPG para la calcitonina (hormona tiroidea) y la PMAR ("proteína modificadora de la actividad del receptor") responde de forma intensa y selectiva a la amilina. Parece que PMAR convierte al receptor de la calcitonina en "plurilingüe", pues éste responde a la calcitonina si las células carecen de PMAR pero es sensible a la amilina si éstas contienen PMAR.

Otra coproteína, la PCR ("proteína componente del receptor"), hace que el receptor de la calcitonina se torne sensible también al PRGC ("péptido relacionado con el gen de la calcitonina"), el vasodilatador más potente que se conoce. Esta transformación adquiere importancia decisiva durante el embarazo, cuando la concentración en sangre del péptido dilatador se dispara y los niveles de PCR aumentan en la pared del útero. A medida que aumenta la concentración de PCR, también lo hace el número de receptores de calcitonina,



FARMACOS EN DESARROLLO

El desarrollo de sustancias cuya acción sobre los RAPG difiere de la acción de los fármacos comunes se encuentra sólo la fase inicial. Se espera que, en los próximos años, muchos de estos agentes se fabriquen en las plantas de producción farmacéuticas.

ENFERMEDAD	TIPO DE FARMACO	NOMBRE DEL FARMACO (FABRICANTE)	RAPG SOBRE EL QUE ACTUA	ESTADO DE DESARROLLO
Infección por VIH	Modulador alostérico	Aplaviroc (GlaxoSmithKline); Vicriviroc (Schering-Plough); UK-427. 857 (Pfizer)	CCR5 (su unión al VIH facilita la entrada del virus en la célula)	Todos se hallan en ensayos clínicos de fase II o III (pruebas de eficacia preliminares o avanzadas)
	Modulador alostérico	AMD3100 (AnorMED)	CXCR4 (también facilita la entrada del virus en la célula)	Ensayos clínicos de fase III
	Inductor de la interiorización	PSC-RANTES (varias instituciones)	CCR5	Fase teórica
Diabetes	Con capacidad para unirse a un receptor bimolecular	Symlin (Amylin)	Complejo formado por la proteína PMAR y el RAPG para la calcitonina (una hormona tiroidea)	Se aprobó en EE.UU. en marzo de 2005
Obesidad	Agonista inverso	Ninguno todavía	Receptor de la grelina con actividad constitutiva alojado en el sistema nervioso central	Fase teórica
	Agonista inverso	Ninguno todavía	Receptor de la histamina H_3 con actividad constitutiva alojado en el sistema nervioso central	Fase teórica
Cáncer	Agonista inverso	Ninguno todavía	Varios RAPG con actividad constitutiva	Fase teórica

que se tornan sensibles al dilatador, un cambio que intensifica el aporte sanguíneo a los tejidos cruciales para el parto.

Dado que las coproteínas afectan a la actividad de los RAPG, podrían resultar útiles como dianas farmacológicas. Pensemos en la modulina, una coproteína que se une a los receptores para la serotonina. En el cerebro, la serotonina opera como un neurotransmisor que potencia el estado de ánimo, de ahí su popularidad (el Prozac y otros antidepresivos incrementan el nivel cerebral de serotonina). Fuera del cerebro, opera sobre los intestinos y los vasos sanguíneos. Existen múltiples subtipos de receptores para la serotonina. Además, la modulina afina aún más los efectos de la serotonina sobre determinadas células, mediante la alteración de la sensibilidad de algún subtipo hacia ésta. Así, un fármaco que remedase o inhibiese a la modulina incrementaría o disminuiría la sensibilidad de ciertos receptores para la serotonina en determinados tipos celulares. Tal sustancia serviría para el tratamiento de trastornos tan diversos como la esquizofrenia o los gastrointestinales.

Se estima que de los 650 genes humanos que presuntamente corresponden a RAPG, unos 330 encierran los planos de dianas farmacológicas potenciales. En el pasado, la investigación farmacéutica se habría centrado en el desarrollo de inhibidores o agonistas clásicos, dirigidos al centro activo del receptor. Sin embargo ahora, ante la abundancia de RAPG que ofrecen múltiples puntos de ataque, las vías para el diseño de nuevas terapias se multiplican. El desarrollo de un fármaco (desde el descubrimiento hasta la comercialización, pasando por los ensayos clínicos que garantizan su eficacia y seguridad) puede llevar quince o incluso veinte años; cualquier predicción detallada resultaría, por tanto, prematura. No obstante, los nuevos descubrimientos sobre el control de los RAPG sugieren que estos viejos conocidos darán todavía mucho más de sí.

El autor

Terry Kenakin viene aplicando la farmacología de receptores al desarrollo de medicamentos desde hace unos tres decenios.

Bibliografía complementaria

NOVEL GPCRS AND THEIR ENDOGENOUS LIGANDS: EXPANDING THE BOUNDARIES OF PHYSIOLOGY AND PHARMACOLOGY. A. Marchese, S. R. George, L. F. Kolakowski, K. R. Lynch y B. F. O'Dowd en *Trends in Pharmacological Sciences*, vol. 20 n.º 9, págs. 370-375; 1 de septiembre de 1999.

DRUG DISCOVERY: A HISTORICAL PERSPECTIVE. J. Drews en *Science*, vol. 287, págs. 1960-1964; 17 de marzo de 2000.

G-PROTEIN-COUPLED RECEPTOR INTERACTING PROTEINS: EMERGING ROLES IN LOCALIZATION AND SIGNAL TRANSDUCTION. A. E. Brady y L. E. Limbird en *Cellular Signalling*, volumen 14, n.º 4, págs. 297-309; abril de 2002.

A PHARMACOLOGY PRIMER: THEORY, APPLICATION AND METHODS. Terry Kenakin. Academic Press; Elsevier, 2003.



1. LA NUEVA VISION de una Tierra primigenia cubierta hace 4400 millones de años por océanos difiere del mundo abrasador y hostil descrito tradicionalmente en los manuales.



Una Tierra primigenia fría

Los manuales han venido enseñando que el magma cubrió la Tierra en sus primeros 500 millones de años. Quizá no estén en lo cierto: parece que la superficie se enfrió rápidamente y los océanos, los primeros continentes y las condiciones idóneas para la vida surgieron mucho antes de lo que se creía hasta ahora

John W. Valley

DON DIXON

En su infancia, hace unos 4500 millones de años, la Tierra brillaba como una tenue estrella. Océanos de magma incandescente, entre amarillo y anaranjado, cubrían la superficie tras las repetidas colisiones con rocas enormes, algunas del tamaño de pequeños planetas, que orbitaban alrededor del Sol recién formado. Cada uno de esos cuerpos, a una velocidad media 75 veces la del sonido, abrasaba la superficie, la hacía añicos, la fundía e, incluso, la evaporaba.

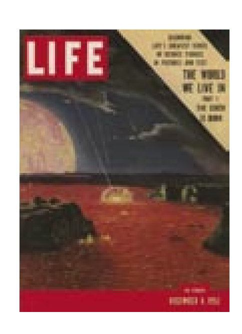
Muy pronto el denso hierro precipitó en los océanos de magma y formó el núcleo metálico. Liberó así energía gravitacional como para fundir el planeta entero. Durante cientos de millones de años siguió habiendo continuos impactos de meteoritos. Algunos producían cráteres de más de mil kilómetros de diámetro. Al mismo tiempo, la desintegración de elementos radiactivos generaba en las profundidades de la Tierra calor a un ritmo que sextuplicaba el actual.

Estas condiciones abrasadoras tuvieron que suavizarse para que las rocas fundidas se solidificaran y formasen la corteza, se constituyesen los continentes, la atmósfera densa y cargada de vapor se condensara en agua líquida y la vida originaria evolucionara y persistiera. ¿Cuánto tiempo tardó en enfriarse la superficie de la Tierra tras su ardiente nacimiento? Por lo general, se ha supuesto que ese ambiente infernal se mantuvo unos 500 millones de años: la era que recibe el nombre de Hadeana. Los elementos de juicio más importantes en favor de esta cifra son la aparente inexistencia de rocas inalteradas de edad superior a los 4000 millones de años y el carácter mucho más reciente de los primeros signos fósiles de vida.

En el curso de los últimos cinco años, sin embargo, los geólogos —incluido mi grupo de investigación de la Universidad de Wisconsin en Madison— han descubierto docenas de cristales de circón antiguos, cuyas composiciones químicas han cambiado nuestra visión de los principios de la Tierra. Las insólitas propiedades de estos cristales tan tenaces les permiten conservar de forma sorprendente potentes indicios de la naturaleza del entorno en que se formaron. Estas diminutas cápsulas del tiempo aportan datos que sugieren que 400 millones de años antes de lo que se pensaba había ya océanos habitables para las primitivas formas de vida, y quizá continentes.

El enfriamiento

Desde el siglo XIX se ha estado intentado calcular el tiempo que tardó la Tierra en enfriarse, pero pocos confiaron en encontrar alguna prueba sólida. Pese a que los océanos de magma alcanzaran en un principio temperaturas superiores a los mil grados Celsius, los cálculos termodinámicos sugirieron la tentadora posibilidad de que la Tierra primitiva fuese más templada: la corteza pudo haberse solidificado en la superficie en un período de 10 millones de años. Como el planeta se iba endureciendo por su parte más externa, la creciente capa de roca consolidada habría aislado el exterior de las altas temperaturas internas. Si hubo suficientes períodos de inactividad entre los mayores impactos de meteoritos, si la corteza fue estable y si la enrarecida atmósfera primigenia no atrapó demasiado calor, las temperaturas de la superficie podrían haber descendido por debajo del punto de



2. LA VIEJA VISION de la Tierra joven como un planeta abrasador: *Life Magazine*, 8 de diciembre de 1952.

TIME LIFE PICTURES/GETTY IMAGES

ebullición del agua. Además, el Sol primitivo era más débil y aportaba menos energía.

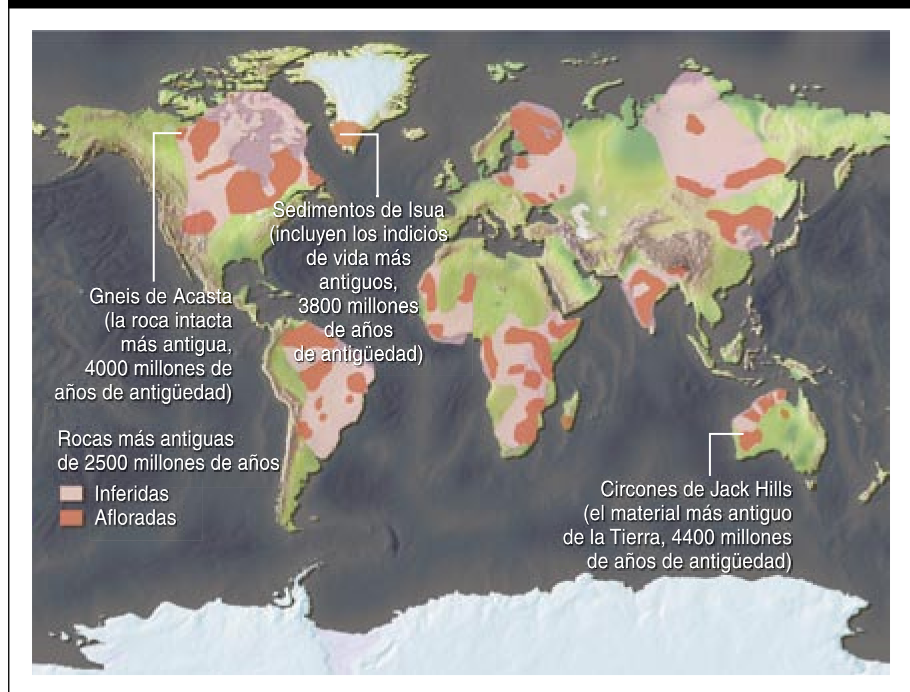
Aun así, para muchos, el nacimiento ígneo y los escasos indicios en el registro geológico señalaban un clima prolongadamente ultracálido. La roca intacta más antigua que se conoce es el gneis de Acasta, en los Territorios canadienses del Noroeste, de 4000 millones de años de antigüedad. Esta roca se formó a gran profundidad y no aporta información sobre las condiciones de la superficie. Muchos daban por sentado que las condiciones infernales de la superficie del planeta habrían hecho desaparecer cualquier roca que se hubiera formado con anterioridad. Las rocas más antiguas de las que consta que se originaron bajo el agua (y por lo tanto en ambientes hasta cierto punto fríos) no se constituyeron antes de hace 3800 millones de años. Esos sedimentos, que afloran en Isua, al suroeste de Groenlandia, contienen también los primeros indicios de vida [*véase* “Las primeras formas de vida, a debate”, por Sarah Simpson; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio 2003].

Los cristales de circón empezaron a aportar nueva información acerca de la Tierra primitiva cuando, en la década de los ochenta, unos raros granos procedentes de las regiones de Jack Hills y el Monte Narryer, en Australia Occidental, se convirtieron en los materiales terrestres más antiguos conocidos hasta ese momento: el más viejo tenía casi 4300 millones de años. Sin embargo, la información que proporcionaron esos circones fue ambigua, en parte porque no se sabía de qué tipo de roca procedían. Una vez formados, los cristales de circón perduran tanto, que permanecen aunque su roca madre aflore en superficie y la destruyan los agentes atmosféricos y la erosión. El viento y el agua pueden entonces transportar los granos supervivientes

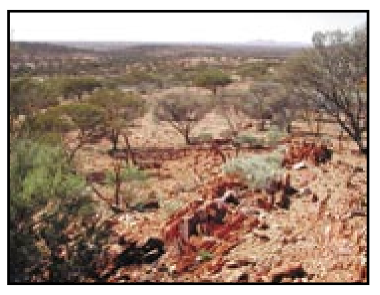
Resumen/Circones: Cápsulas del tiempo

- Durante mucho tiempo se ha creído que en nuestro planeta perduraron unas condiciones abrasadoras hasta unos 700 millones de años después de su formación hace 4500 millones de años.
- Pero ahora se sabe, gracias a unos diminutos cristales de circón que contienen claras señales de cómo y cuándo se originaron, que la Tierra se enfrió mucho antes, quizá ya hace 4400 millones de años.
- Algunos circones antiguos presentan incluso una composición química heredada del medio más frío y húmedo necesario para la evolución de la vida.

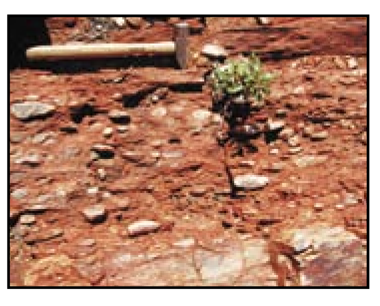
LAS REGIONES MAS ANTIGUAS DEL PLANETA



Las rocas de hace más de 2500 millones de años afloran o se encuentran en el subsuelo inmediato de muchos puntos del planeta (*rojo*); probablemente se esconden también bajo rocas más jóvenes a lo largo de regiones aún más extensas (*rosa*). Es posible que se descubran cristales de circón de la antigüedad de los de Jack Hills, al oeste de Australia, en alguno de esos lugares.



Lecho de grava fósil en Jack Hills (*arriba*) que contiene los circones más antiguos del mundo descubiertos hasta hoy. Se trituraron y clasificaron centenares de kilogramos de esta roca (*abajo*) para encontrar 20 cristales en los que se observan signos de condiciones ambientales frías hace más de 4000 millones de años.



LUCY READING-IKKANDA; FUENTE: WILLIAM H. PECK *Universidad Colgate (mapa)*; JOHN W. VALLEY *(fotografía)*

a grandes distancias, antes de que se incorporen a depósitos de arena y gravas que más tarde se solidificarán en una roca sedimentaria: los circones de Jack Hills —recogidos quizás a miles de kilómetros de su origen— se encontraron incrustados en una grava fósil, el “conglomerado de Jack Hills”.

Pese a la emoción por descubrir esos fragmentos de una Tierra joven, la mayoría de los científicos, y yo con ellos, siguió aceptando que el clima de nuestro planeta en su juventud fue hadeano. Sólo en 1999 permitieron los avances técnicos estudiar más a fondo los antiguos cristales de circón de Australia Occidental. Los resultados socavaron esas certidumbres.

Circones

Costó que los circones de Australia desvelasen sus secretos. Por un lado, Jack Hills y sus alrededores son polvorientos yermos al final de dos grandes explotaciones ovinas, Berringarra y Mileura, situadas a unos 800 kilómetros al norte de Perth, la ciudad más aislada de Australia. El conglomerado de Jack Hills se depositó hace 3000 millones de años y marca el límite noroccidental de un extenso conjunto de formaciones rocosas de más de 2600 millones de años de antigüedad. Para recuperar un puñado escaso de circones, tuvimos que recoger cientos de kilos de roca de estos afloramientos tan remotos y llevarlos al laboratorio para triturarlos y clasificarlos; fue como buscar unos cuantos granos especiales en la arena de una playa.

Una vez extraídos de la roca donde estaban incrustados, se puede datar los cristales porque el circón es un cronómetro ideal. Además de su longevidad, contienen trazas de uranio radiactivo que se desintegra en plomo a una cadencia conocida. Cuando un circón se forma a partir de un magma solidificado, átomos de circonio, silicio y oxígeno se combinan en proporciones exactas ($ZrSiO_4$) para crear una estructura cristalina exclusiva del circón; el uranio sustituye, ocasionalmente, alguno de esos átomos como una traza de impureza. Por otro lado, los átomos de plomo son demasiado grandes para reemplazar fácilmente cualquiera de los elementos de la retícula; por eso, los circones nacen casi libres de plomo. El reloj uranio-plomo empieza a funcionar en cuanto cristaliza el circón. De este modo, la relación plomo/uranio aumenta con la edad del cristal. Se puede determinar la edad de un circón intacto con una precisión de un 1 por ciento; respecto a la edad de la Tierra primigenia, ello supone alrededor de 40 millones de años.

La datación de partes específicas de un cristal en particular fue posible desde principios de los años ochenta, cuando William Compston y sus colaboradores de la Universidad Nacional de Australia en Canberra inventaron una microsonda de iones de alta resolución. Aunque la mayoría de los circones resultan casi imperceptibles a simple vista, la microsonda de iones dispara un haz de iones tan preciso y concentrado que puede arrancar un pequeño número de átomos de cualquier parte de la superficie del circón que se escoja. Un espectrómetro de masas calcula entonces la composición de esos átomos mediante la compara-

OBTENCION DE PRUEBAS

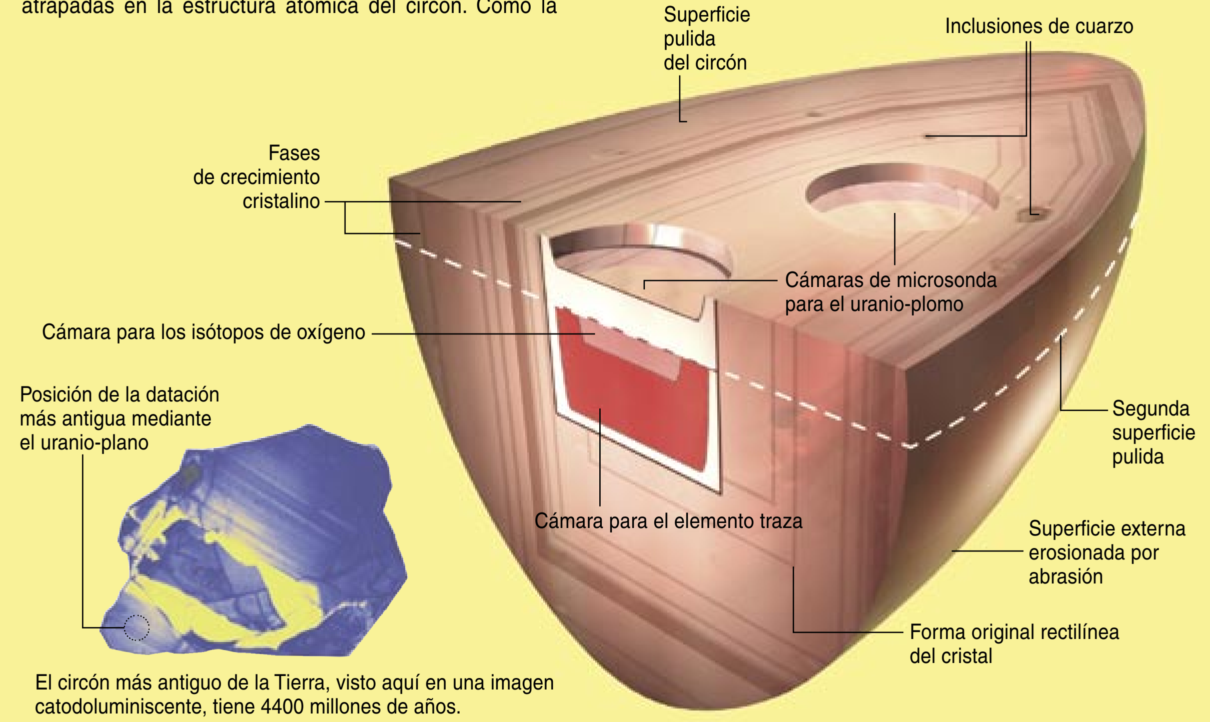
De un solo cristal de circón puede aprenderse mucho acerca del antiguo ambiente de la Tierra (*corte transversal, abajo*). Primero se introduce el circón en una resina epoxy; después, se trabaja y pule el cristal hasta que muestre una superficie inmaculada.

Un microscopio electrónico de barrido identifica las pautas de crecimiento del circón y cualquier fragmento menor de minerales atrapados durante su crecimiento. Las inclusiones de cuarzo, por ejemplo, se dan sobre todo en circones procedentes del granito, tipo de roca característico de los continentes.

Una microsonda de iones crea una pequeña cámara arrancando átomos de la superficie pulida con un estrecho haz de iones e identifica dichos átomos por comparación de sus masas. Para determinar la edad del cristal, se miden los átomos de uranio y plomo, dos impurezas atrapadas en la estructura atómica del circón. Como la desintegración radiactiva del uranio en plomo ocurre a una cadencia constante, cuanto más plomo haya con respecto al uranio, más antiguo será el cristal.

Se sigue trabajando la superficie hasta descubrir una capa más profunda del cristal, donde la microsonda abre una segunda cámara en el mismo sitio que la primera. Ahora se miden los átomos de oxígeno, uno de los tres elementos que componen un circón. La relación entre ciertos isótopos de oxígeno —átomos de oxígeno con diferentes masas— revela si las propiedades del circón corresponden a condiciones cálidas o frías.

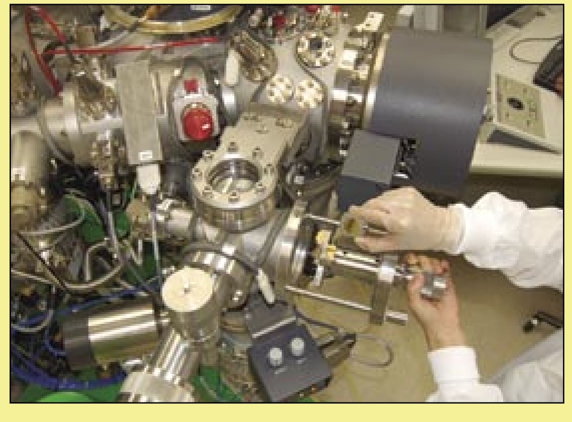
Se crea una tercera cámara para medir la abundancia de algunos elementos de traza (impurezas que suponen menos del 1 por ciento de la estructura del cristal). Algunos de esos elementos abundan en la corteza continental.



El circón más antiguo de la Tierra, visto aquí en una imagen catodoluminiscente, tiene 4400 millones de años.

DE CERCA





Estos circones rojos (*derecha*), fotografiados cerca de la nariz de Roosevelt en una moneda de diez centavos para que se vea la escala, proceden de la misma muestra de roca que contenía el cristal más antiguo de la Tierra. Una microsonda de iones, como la del laboratorio del autor en la Universidad de Wisconsin en Madison (*más a la derecha*), puede analizar relaciones isotópicas o elementos de traza en puntos con un diámetro de sólo una quinceava parte del diámetro del propio cristal.

JOHN W. VALLEY (*laboratorio*); SIMON A. WILDE *Universidad Tecnológica Curtin* (*circón antiguo*); ALFRED T. KAMAJIAN; FUENTE: AARON J. CAVOSIE UNIVERSIDAD DE WISCONSIN EN MADISON (*esquema del circón y circones rojos*)

ción de sus masas. Fue el grupo de Compston —junto con Robert T. Pidgeon, Simon A. Wilde y John Baxter, entonces en la Universidad Curtin de Tecnología, también en Australia— el que datό, en 1986, los circones de Jack Hills.

Conocedor de todo esto, me puse en contacto con Wilde. Accedió a investigar de nuevo las dataciones de los circones de Jack Hills a partir de la relación uranio-plomo como parte de la tesis doctoral de mi alumno William H. Peck, hoy profesor de la Universidad Colgate. En mayo de 1999 Wilde analizó 56 cristales no datados con una microsonda de iones de alta resolución, refinada, de la Universidad Curtin. Encontró cinco que sobrepasaban los 4000 millones de años de antigüedad. Algunas muestras de la Luna y Marte tienen edades parecidas. Los meteoritos son en general más antiguos. Pero no se había encontrado (ni esperado encontrar) nada de esa época que procediese de nuestro planeta. Casi todo el mundo daba por sentado que circones de tamaña edad, si hubieran existido alguna vez, habrían sido destruidos por las condiciones dinámicas de la época Hadeana. Unos pocos, en cambio, confiábamos en que los descubrimientos más interesantes estaban aún por llegar.

Vestigios de antiguos océanos

Peck y yo nos interesamos por los circones de Wilde procedentes de Australia Occidental porque estábamos buscando muestras bien conservadas del oxígeno más antiguo de la Tierra. Sabíamos que un circón podía contener pruebas no sólo de cuándo se formó la roca que lo alojaba, sino también de cómo se formó ésta. En particular, íbamos a apoyarnos en las proporciones relativas de los isótopos de oxígeno para estimar las temperaturas de los procesos que desembocaron en la formación de magmas y rocas.

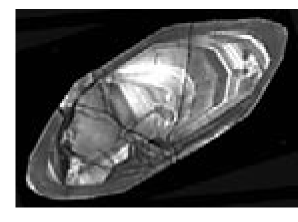
Los geoquímicos miden la proporción relativa del oxígeno 18 (^{18}O, un isótopo raro con ocho protones y 10 neutrones, que representa un 0,2 por ciento del oxígeno de la Tierra) y el oxígeno 16 (^{16}O, el isótopo de oxígeno más común, con ocho protones y ocho neutrones, que comprende aproximadamente el 99,8 por ciento del oxígeno). A tales isótopos se les llama estables porque no sufren desintegración radiactiva y, por lo tanto, no cambian espontáneamente con el tiempo; sin embargo, las proporciones de ^{18}O y ^{16}O incorporadas al formarse un cristal varían según la temperatura ambiental y el tiempo de formación del cristal.

La relación $^{18}O/^{16}O$ se conoce bien en el caso del manto terrestre (la gruesa capa de 2800 kilómetros que se halla inmediatamente bajo la fina capa —de 5 a 40 kilómetros de grosor— de los continentes y la corteza oceánica). Los magmas formados en el manto siempre tienen unas proporciones relativas de isótopos de oxígeno similares. Para mayor sencillez, esta relación se calibra respecto a la existente en el agua de mar y se la expresa mediante δ. La $\delta^{18}O$ del océano es 0 por definición, y la $\delta^{18}O$ del circón procedente del manto es de 5,3, lo que significa que éste tiene una relación $^{18}O/^{16}O$ superior a la del agua de mar.

Por esta razón, Peck y yo mismo esperábamos encontrar un valor del manto primitivo cercano a 5,3 cuando trajimos los circones de Wilde encontrados en Jack Hills, incluidos los cinco más antiguos, a la Universidad de Edimburgo. Allí, John Craven y Colin Graham nos ayudaron con otra microsonda de iones, muy apropiada para medir relaciones de isótopos de oxígeno. Habíamos trabajado con ellos durante diez años para perfeccionar esta técnica. Logramos analizar muestras de una millonésima parte del tamaño de las que por aquel entonces se podían analizar en mi laboratorio de Wisconsin. Tras once días de análisis a jornada completa, finalizamos las medidas y descubrimos que nuestras predicciones eran erróneas. Los valores de la $\delta^{18}O$ llegaban incluso a 7,4.

¿Qué podían significar estas relaciones tan altas de los isótopos de oxígeno? La respuesta habría sido obvia en el caso de las rocas más recientes, para las que muestras así son comunes: las rocas de la superficie terrestre, a bajas temperaturas, pueden alcanzar altas relaciones de isótopos de oxígeno si interactúan químicamente con la lluvia o el agua del océano. Esas rocas con una alta $\delta^{18}O$, si subducen y se funden, se convierten en magma que retiene altos valores de $\delta^{18}O$. Estos valores se mantienen en los circones durante su cristalización. Así pues, se requieren agua líquida y bajas temperaturas en la superficie de la Tierra para que se formen circones y magmas con altas $\delta^{18}O$; no se conoce ningún otro proceso que produzca dicho resultado.

El hallazgo de altas relaciones de isótopos de oxígeno en los circones de Jack Hills llevaba a pensar que hubo agua líquida en la superficie de la Tierra al menos 400 millones de años antes de la formación de las rocas sedimentarias más antiguas, las de Isua, en Groenlandia. Si en efecto la hubo, lo más probable es que también hubiera ya grandes océanos. El clima de la Tierra primigenia se habría parecido más a una sauna que a una bola de fuego hadeana.



AARON J. CAVOSIE *Universidad de Wisconsin en Madison*

Pistas continentales

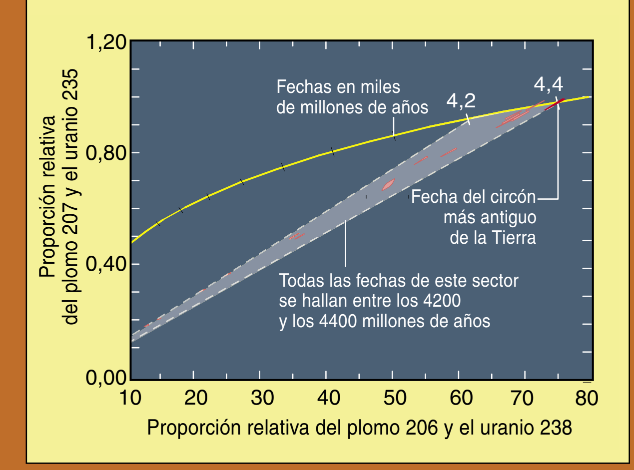
¿Podemos basar unas conclusiones tan importantes sobre la historia de la Tierra en unos pocos cristales diminutos? Demoramos la publicación de nuestros hallazgos durante un año para revisar dos veces los análisis. Mientras tanto, otros grupos sacaban adelante sus propias investigaciones de los cristales de Jack Hills. Stephen J. Mojzsis, de la Universidad de Colorado, y sus colaboradores de la Universidad de California en Los Angeles confirmaron nuestros resultados. En 2001 publicamos a la par artículos que describían nuestros descubrimientos. A medida que se extendían entre los científicos las posibles implicaciones de estos hallazgos fue haciéndose manifiesta la excitación que suscitaban. En la violencia supercalentada del mundo hadeano, no hubieran sobrevivido muestras válidas para su estudio por los geólogos. Pero estos circones dejaban vislumbrar un mundo más benigno y familiar, a la vez que proporcionaban un medio para desentrañar sus secretos. Si el clima de la Tierra fue pronto tan frío como para permitir la existencia de océanos de agua, quizá los circones nos dirían si existían ya por entonces también los continentes y otras estructuras de la Tierra moderna. Para

LO QUE NOS CUENTAN

Los circones de Jack Hills, en Australia occidental, han cambiado la manera de pensar respecto a la historia más antigua de la Tierra. Estos cristales son los materiales terrestres más antiguos descubiertos hasta el momento: se han encontrado centenares formados hace más de 4000 millones de años. Muchos de estos minúsculos cronómetros ofrecen claras señales químicas de que en la superficie de la Tierra existieron océanos de agua, y puede incluso que también continentes, en una época en que se la creía fundida, ardiente.

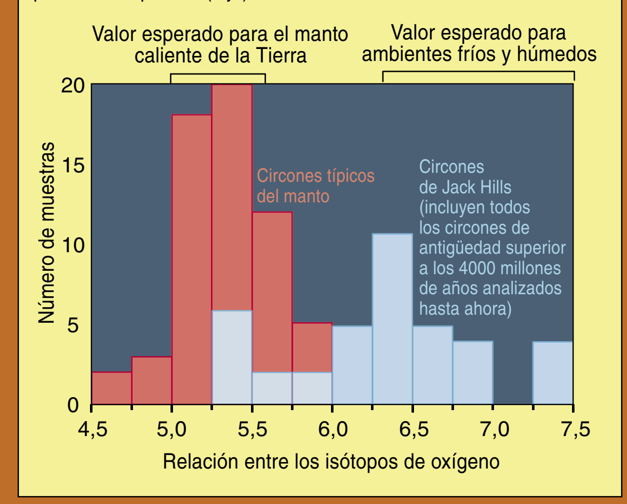
EDAD ANTIGUA

En la edad del más antiguo circón de Jack Hills —4400 millones de años (*rojo*)— coinciden con exactitud dos "relojes" geológicos. Dos pares de isótopos —uranio 235-plomo 207 (*eje vertical*) y uranio 238-plomo 206 (*eje horizontal*)— conforman dos cronómetros radiactivos que empiezan a funcionar cuando se constituye el circón. Si están bien conservados, sus proporciones relativas se disponen a lo largo de una línea (*amarillo*). Dataciones de otras partes del circón (*rosa*) no caen sobre esta línea porque en ellas se perdió plomo, aunque se puede aplicar una corrección que enmiende ese deterioro.



OCEANOS FRIOS

Las relaciones de isótopos de oxígeno de las muestras de circones de Jack Hills (*azul*) que superan el 7,5 sólo son posibles si su roca madre se formó en un ambiente lo bastante frío, rico en agua y cercano a la superficie de la Tierra. Si el planeta hubiera estado cubierto de océanos de magma cuando se formaron estos circones, los valores de esas proporciones se acercarían a 5,3, como ocurre en todos los cristales de rocas calientes originadas en el interior profundo del planeta (*rojo*).



¿LOS PRIMEROS CONTINENTES?

Las superficies redondeadas de algunos circones de Jack Hills observados con el microscopio electrónico de barrido demuestran que el viento, y posiblemente el agua corriente, transportaron estos cristales a largas distancias —a través quizá de una gran masa continental— antes de que se los depositase (*derecha*). Los circones hallados cerca de su origen mantienen sus formas iniciales (*más a la derecha*). El gran número de circones antiguos y erosionados de Jack Hills da a entender que procedían de rocas muy extendidas.





LUCY READING-IKKANDA; FUENTE: SIMON A. WILDE *Universidad Tecnológica Curtin (uranio-plomo)*; LUCY READING-IKKANDA; FUENTE: JOHN W. VALLEY *(relación entre los isótopos de oxígeno)*; AARON J. CAVOSIE *University of Wisconsin-Madison (granos de circón)*

averiguarlo, tendríamos que observar más detalladamente el interior de los cristales.

Incluso los circones más pequeños contienen otros materiales que quedaron atrapados a medida que crecía el circón a su alrededor. Esas inclusiones en los circones pueden desvelar mucha información sobre la procedencia y pautas de crecimiento del cristal y la composición de los elementos de traza. Cuando Peck y yo estudiamos el circón de 4400 millones de años de antigüedad, por ejemplo, encontramos que contenía fragmentos de otros minerales, incluso de cuarzo. Resultó muy sorprendente porque el cuarzo es muy raro en las rocas primitivas y no debió de estar en la corteza más temprana de la Tierra. La mayor parte del cuarzo procede de rocas graníticas, frecuentes en una corteza continental más evolucionada.

Si los circones de Jack Hills proceden de una roca granítica, el hallazgo apoyaría la hipótesis de que proceden del primer continente de nuestro planeta. Pero la cautela es necesaria. El cuarzo puede formarse en las últimas etapas de la cristalización del magma, a pesar de que su roca madre no sea granítica; ese cuarzo, sin embargo, abunda bastante menos. Así, se han hallado circones y algunos granos de cuarzo en la Luna, donde nunca se ha desarrollado una corteza granítica de tipo continental. Algunos se han preguntado si los primeros circones se formaron en un medio más parecido al de la Luna primigenia o a través de algún proceso hoy menos frecuente, quizá relacionado con gigantescos impactos de meteoritos o con un vulcanismo profundo, pero no se han encontrado pruebas convincentes.

En el ínterin, otras pistas sobre la corteza continental provienen de los elementos de traza (esos elementos de sustitución que se encuentran en los circones en proporciones inferiores al 1 por ciento). Los circones de Jack Hills contienen elevadas concentraciones de estos elementos, amén de muestras de europio y cerio, por lo general creados durante la cristalización de la corteza; la conclusión es que los circones se formaron más cerca de la superficie de la Tierra que del manto. A ello hemos de añadir que las proporciones relativas de los isótopos radiactivos de neodimio y hafnio —dos elementos empleados para la datación de los eventos de la formación de la corteza continental— sugieren que se crearon porciones considerables de corteza continental en una fase temprana, hace 4400 millones de años.

La distribución de los circones más antiguos aporta una prueba adicional. La proporción de circones de más de 4000 millones de años supera el 10 por ciento en algunas muestras de Jack Hills. Además, las superficies de los circones se hallan muy erosionadas: las caras angulares originales de los cristales están redondeadas, señal de que recorrieron largas distancias. ¿Cómo podrían haber viajado estos circones cientos o miles de kilómetros en forma de polvo en suspensión y continuar concentrados, si no hubieran sido antaño muy numerosos? Más aún, ¿cómo pudieron estos circones evitar su hundimiento y fusión en el manto caliente si no hubiera existido una gruesa y estable corteza continental que los preservara?

Estos hallazgos implican que los circones fueron, alguna vez, abundantes y que procedían de una extensa región original, posiblemente una masa continental. Si fue así, parece muy verosímil que aún existan rocas de esa edad tan temprana, posibilidad más que atractiva, ya que de una roca de tal antigüedad aprenderíamos muchas cosas.

Añádase que la distribución de las edades de los circones más antiguos es desigual. Se acumulan en ciertos períodos, mientras que de otras eras no se encuentran circones. Aaron J. Cavosie, de la Universidad de Puerto Rico, ha encontrado esta misma concentración temporal incluso dentro de algunos circones zonificados, con un núcleo de hace 4300 millones de años, al que rodea un crecimiento muy posterior, de entre 3700 y 3300 millones de años. Que la edad del circón decrezca desde el núcleo hasta los márgenes no sorprende, ya que los cristales de circón crecen concéntricamente por adición de material a su grano. Pero la gran diferencia de antigüedad y los vacíos temporales entre los núcleos y los márgenes de esos circones apunta a dos eventos diferentes, separados por un largo paréntesis. En los circones más recientes y fáciles de conseguir, ese tipo de relación temporal entre el núcleo y el margen se debe a procesos tectónicos que funden la corteza continental y reciclan los circones de su interior. Hay científicos que se proponen someter a comprobación si condiciones similares produjeron los circones de Jack Hills.

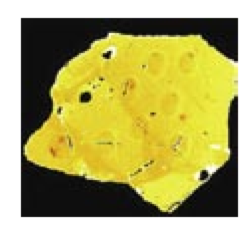
E. Bruce Watson, del Instituto Politécnico Rensselaer, y T. Mark Harrison, de la Universidad Nacional de Australia, han anunciado niveles de titanio por debajo de los esperados en estos circones antiguos: las temperaturas de sus magmas de origen deben de haber estado entre los 650 y los 800 grados. Unas temperaturas tan bajas sólo fueron posibles con roca madre granítica; la mayoría de las rocas no graníticas funden a temperaturas superiores y, por lo tanto, sus circones contendrían más titanio.

Los circones son para siempre

Desde que analizamos las proporciones relativas de los isótopos de oxígeno de aquellos cinco circones de Jack Hills en 1999, el cúmulo de datos que apoyan nuestras conclusiones ha crecido muy deprisa. Investigadores de Perth, Canberra, Pekín, Los Angeles, Edimburgo, Estocolmo y Nancy han puesto decenas de miles de circones de Jack Hills en microsondas iónicas en busca de los que tienen más de 4000 millones de años; también se han utilizado otras técnicas de datación.

En los últimos años se han descubierto en distintos emplazamientos centenares de circones de edades comprendidas entre los 4400 y los 4000 millones de años. El grupo de David R. Nelson, del Servicio Geológico de Australia Occidental, ha dado con circones de esa antigüedad 300 kilómetros al sur de Jack Hills. Se están explorando otras regiones antiguas de la Tierra con la esperanza de hallar los primeros circones de más de 4100 millones fuera de Australia.

La intensa busca promueve la mejora de la técnica. Cavosie ha alcanzado una precisión mucho mayor en los análisis; lleva contados más de 20 circones de Jack Hills con la proporción relativa elevada de los isótopos de oxígeno, que nos hablan de bajas temperaturas en superficie y de océanos hace 4200 millones de años. Con mi equipo, sigo buscando, ahora con el primer modelo de la última generación de microsondas.



SIMON A. WILDE *Universidad Tecnológica Curtin*

Si se encontrasen fragmentos de la roca madre original de los circones, muchas preguntas se responderían. Pero aunque no aparecieran nunca, todavía tendríamos mucho que aprender de esas minúsculas cápsulas de tiempo.

El autor

John W. Valley se doctoró en 1980 por la Universidad de Michigan en Ann Arbor. Desde entonces ha explorado con sus alumnos la historia geológica de las rocas antiguas de Norteamérica, Australia Occidental, Groenlandia y Escocia. Hoy en día preside la Sociedad Mineralógica de América y ocupa la cátedra Charles R. Van Hise de geología de la Universidad de Wisconsin en Madison, donde ha fundado el laboratorio WiscSIMS.

Bibliografía complementaria

A COOL EARLY EARTH. John W. Valley, William H. Peck, Elisabeth M. King y Simon A. Wilde en *Geology*, vol. 30, n.º 4, páginas 351-354; abril de 2002.

MAGMATIC $\delta^{18}O$ IN 4400-3900 MA DETRITAL CIRCONS: A RECORD OF THE ALTERATION AND RECYCLING OF CRUST IN THE EARLY ARCHEAN. A Cavosie, John W. Valley, Simon A. Wilde y el Edinburgh Ion Microprobe Facility en *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 235, n.º 3, págs. 663-681; 15 de julio, 2005.

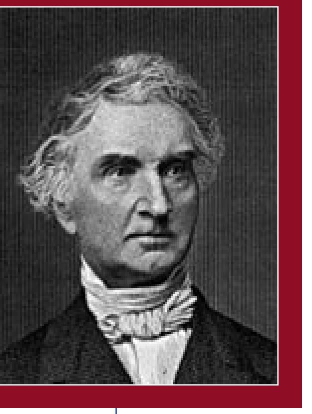
Hervé This

Menú navideño dedicado a los químicos

A quienes la química les intimida confunden la ciencia química, productora de conocimiento, con algunas de las aplicaciones de la misma, entre ellas, los gases bélicos. También la idea de "comer química" asusta. Por tal razón, presentamos una propuesta que pretende cambiar esos prejuicios: bautizaremos nuevos platos, de elaboración sencilla, con grandes nombres de la ciencia.







Relatividad gustativa

Además de la naturaleza química de las grasas, a Michel-Eugène Chevreul (1786-1889) le interesaron también los colores, tras ser nombrado director técnico de la Manufactura de los Gobelinos. Allí descubrió la "ley del contraste simultáneo de los colores", según la cual un color modifica a los colores vecinos por su complementario. Así, el contorno de una mancha azul sobre un fondo blanco parece ennegrecido (el negro es el complementario del blanco), a la vez que parece teñir de amarillo el blanco que la circunda (el amarillo es el complementario del azul).

Esta teoría no cuenta todavía con una correspondencia culinaria exacta, pues el equivalente gustativo al mecanismo de inhibición de las células fotorreceptoras por una célula fotorreceptora vecina no se ha elucidado por completo. Sí sabemos, no obstante, que la intensidad de un sabor varía en función de su contexto.

Además, los mismos mecanismos cerebrales que intervienen en el olfato o la vista para inhibir la respuesta a un estímulo constante (el olor a cerrado de un cuarto sin ventilar deja de percibirse tras permanecer largo tiempo en él; en una habitación iluminada con luz de color acabamos por reconocer los colores de los objetos) pueden utilizarse también en cocina. Por ejemplo, un arroz salado nos parece muy salado si lo probamos en compañía de la misma materia menos salada, pero soso si va acompañado de arroz más salado todavía. Un plato como éste, capaz de hacernos percibir la relatividad de los sabores, merecería el nombre de Chevreul.

Un flan de categoría

A tal señor, tal honor: el plato que llevará el nombre de Antoine-Laurent de Lavoisier (nacido en 1743 y guillotinado en 1794, durante el Terror, cuando la República pensaba que los sabios eran prescindibles) será necesariamente un royal, una preparación clásica que se obtiene por cocción de una disolución acuosa con añadido de huevo: la coagulación de éste forma una textura que la cocina denomina flan y la física gel. ("Royal" significa "regio" en francés, de ahí el juego de palabras.)

Un *Lavoisier* corresponderá a una versión límite de esta receta. Dado que los geles necesitan alrededor del uno por ciento de agente gelificante, reduciremos la cantidad de huevo con el fin de obtener una preparación ligeramente cuajada, que no sepa a huevo, sino a la disolución acuosa empleada. Tomemos, por ejemplo, tomate: se tritura, se sazona (con anís estrellado, sal, pimienta...) y se añade alrededor de un huevo por cada 0,7 litros de jugo de tomate. La mezcla se cuece al horno en los mismos recipientes en que se sirve. Por fin, se acompaña de una oblea crujiente que obtendremos al freír una fina lámina de masa de pan (harina y agua).

Sopa instantánea en emulsión

Otro de los grandes de la química: Justus von Liebig (1803-1873). Tras crear en Giessen un gran laboratorio en el que desarrolló el análisis químico (determinación del contenido en carbono e hidrógeno de muestras orgánicas), se retiró a Múnich, donde aplicó los principios de la naciente química orgánica a la agricultura y a la alimentación, entre otros campos. Contribuyó también a la obtención de concentrados de caldo de carne por evaporación al vacío de jugo de carne picada o de caldo. Liebig merece un plato en el que la gelatina sea la *prima donna*: le dedicaremos, pues, una emulsión gelificada. Disolvamos gelatina en caldo de ave; añadamos después aceite mientras batimos, para obtener una emulsión. Esperemos a que cuaje y tendremos listo un "Liebig de pollo".

Jalea parda de zanahorias

Semejante menú no puede olvidar a Louis-Camille Maillard (1879-1936), químico de Nancy que, en 1912, descubrió las reacciones que hoy llevan su nombre. En éstas, un azúcar "reductor" (glucosa, fructosa) reacciona con un aminoácido para producir un "compuesto de Amadori" que se reestructura y da lugar a una serie de moléculas odorantes, sápidas y coloreadas. A estas (y otras) reacciones debemos el vigoroso sabor y el color moreno de la corteza de pan, de la costra de los asados, del chocolate o del café torrefacto.

Mezclemos zanahoria (que aportará los azúcares reductores) con una fuente de aminoácidos (gelatina o bien un caldo de carne coriácea, rica en tejido colaginoso). Calentemos la mixtura hasta la casi desecación: aparecerá un color pardusco, debido sobre todo a reacciones de Maillard.

"Ciencia infusa"

A Dmitri Mendeleiev (1834-1907), padre de la tabla periódica de los elementos, le correspondería un plato fundado en un enfoque sistemático. Sean su homenaje los distintos avatares de la infusión.

La infusión clásica se obtiene por inmersión de hierbas aromáticas (té, manzanilla, etcétera) en agua caliente. No debe confundirse con la maceración (en agua fría) ni la cocción (en agua hirviente). Cabe pues una clasificación en función de la temperatura. Podemos variar también el disolvente. Si sustituimos el agua por alcohol o aceite obtenemos, en cada caso, una extracción distinta de moléculas odorantes o sápidas. Así, daremos el nombre de "Mendeleiev de puerro al aceite" a la maceración en aceite del verde de los puerros, finamente troceado. El autor insta a utilizar este aceite para elaborar un Liebig de puerro que se dispondrá sobre una capa de gel de olivas negras, obtenido por cocción de olivas en agua y gelificado luego mediante gelatina.

Bollos de castaña

Parmentier. El nombre existe ya en cocina: se le da a los platos con base de patata. Pensemos en el "hachís Parmentier", por ejemplo, un pastel de carne picada con puré de patatas. No obstante, Antoine Augustin Parmentier (1737-1813), farmacéutico, agrónomo e introductor de la patata en Francia, es merecedor de algo más que un plato en el que se reciclan restos de carne.

Parmentier se propuso hacer pan con la fécula de la patata. Sin embargo, al carecer del gluten del trigo (que confiere elasticidad al amasado de harina y agua), obtenía una pasta demasiado compacta. Parmentier propuso entonces extraer el gluten del trigo y añadirlo al almidón de la patata.

No obstante, dado que el almidón de la patata resulta un tanto insípido, se recomienda el uso de harinas de sabor más intenso; la de maíz o la de castañas. Añadamos, pues, el gluten y la levadura a alguna de estas harinas y obtendremos bollos de pan de castaña o de maíz. Unos bollos *à la Parmentier* verdaderamente dignos del personaje.

Y de postre... tartratos

Louis Pasteur (1822-1895) comenzó su carrera con un soberbio trabajo de química: mientras estudiaba los cristales de tartrato y de paratartrato, observó la influencia de la estructura molecular sobre la luz polarizada. Pero no degustaremos aquí los tartratos ni los paratartratos (presentes en el poso de las botellas de vino), sino el ácido tartárico. Nos daremos cuenta enseguida de que la acidez esconde múltiples matices: nada tiene que ver el sabor ácido del tartárico con el del acético, por ejemplo.

¿Por qué, entonces, el cocinero no opera con mayor precisión y dosifica a su conveniencia cada una de las sustancias que configuran su plato? (Cocinar con vino, por ejemplo, implica la utilización simultánea, en cantidades fijas, de tartratos, etanol, agua y compuestos fenólicos) Por supuesto, numerosas moléculas orgánicas exigen cautela (ya lo escribió Paracelso: "Es la dosis lo que hace el veneno"), por lo que la exploración culinaria deberá acometerse con suma prudencia. Prepararemos, con el tartárico, un ácido de elegante paladar, una jalea de pomelo rosa a la tila.

Se pelan cuatro pomelos, dejando en las peladuras un poco de carne. Esta gruesa piel se corta en cuadrados grandes; la carne del pomelo, en rodajas finas. El zumo se conserva. Luego, las pieles de los pomelos se sancochan tres veces (nunca enfriarlas con agua fría). En una cacerola de fondo grueso se echan el agua mineral, el ácido tartárico (3 gramos), las pieles de los pomelos y el mismo peso en azúcar.

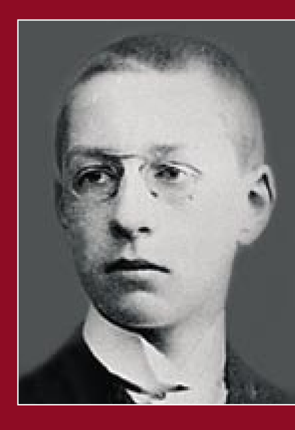
La mezcla se cuece, tapada y a fuego lento, durante dos horas. Se remueve a menudo con una espátula de madera. Se añade luego el zumo y las rodajas. La cocción prosigue a fuego lento durante otros 20 minutos. Después, se añade la tila, encerrada en una bolsita de muselina. Se retira del fuego y se deja enfriar en la propia cacerola, removiendo de cuando en cuando. Por fin, se vierte en un recipiente hermético (que en la nevera puede conservarse hasta un mes). Obtendremos así un delicioso acompañamiento para el helado de vainilla y nueces, y las galletas al limón; suavizado con leche de oveja, combina también con fiambres.

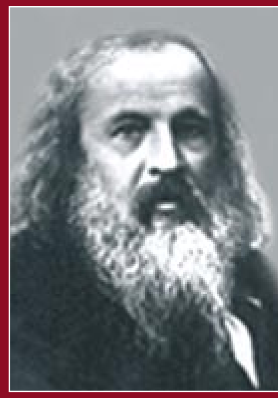
Mousse gelificada de moléculas cítricas

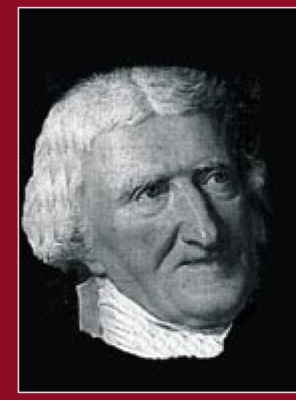
No podemos terminar este banquete dedicado a los químicos sin recordar también a Charles Adolphe Würtz (1817-1884), quien introdujo en Francia la teoría atómica, al propio tiempo que Marcellin Berthelot negaba la existencia de las moléculas. Ofrendemos, pues, un manjar a este químico para que, a modo de duende benefactor, nos ayude a vencer los prejuicios antimoleculares.

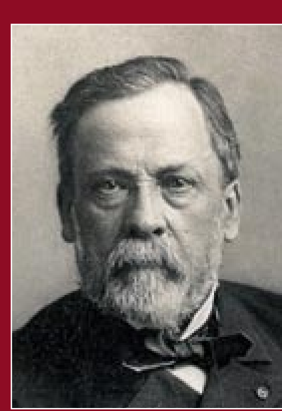
Calentamos zumo de cítricos con azúcar y miel. Batimos la disolución durante largo tiempo, a fin de introducir una gran cantidad de burbujas de aire. Luego, cuando la espuma se enfría (dejamos reposar el recipiente sobre hielo), se le añade gelatina reblandecida con agua fría. Se obtiene así una "*mousse* de cítricos gelificada" ligera y sabrosa, que se sirve acompañada de un sorbete de almendras amargas, helado de pistacho o manzana *golden* confitada.

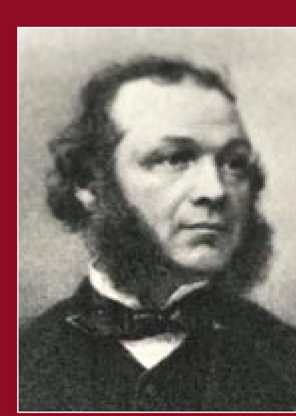
¿A quién no le apetece ahora "comer química"?











Los protagonistas del suculento menú navideño. A la izquierda, de arriba abajo: Chevreud, Lavoisier y Liebig. A la derecha, de arriba abajo: Maillard, Mendeleiev, Parmentier, Pasteur y Würtz.

Fotofragmentación de la molécula de deuterio

Efecto fotoeléctrico

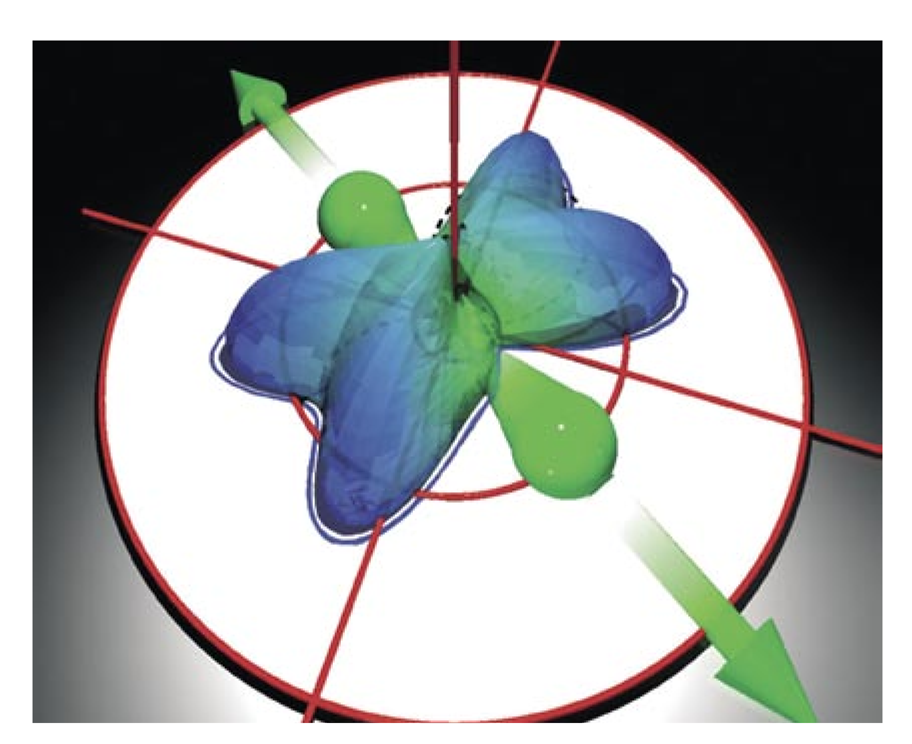
En 1905, Albert Einstein publicó en *Annalen der Physik* cinco artículos históricos que han llevado a considerar dicho año su *annus mirabilis*. De estos trabajos, Einstein calificó de "revolucionario" sólo uno: el que describía la propagación de la luz a partir de la existencia de "un número finito de cuantos de energía localizados en puntos del espacio que se mueven sin dividirse y sólo pueden ser absorbidos o generados como unidades completas". Se trataba de la primera descripción teórica del efecto fotoeléctrico, en términos de la absorción de fotones: la base a partir de la cual se han desarrollado numerosas técnicas de caracterización y espectroscopía de superficies, sólidos, átomos y moléculas en fase gaseosa.

En un experimento de fotoemisión se provoca que el sistema de interés absorba luz, para que luego se produzca la emisión de electrones portadores de información sobre el sistema. La energía cinética de cada uno de estos electrones E_k se estima como la suma de la energía inicial de ligadura del electrón E_b más la energía del fotón absorbido $h\nu$ ($E_k = E_b + h\nu$). En el caso de átomos y moléculas en fase gaseosa, las técnicas de fotoemisión se han utilizado ampliamente para determinar la energía de ligadura de electrones en capas internas y de valencia. La fotoemisión ha demostrado ser de gran utilidad también en el estudio de enlaces químicos, estados vibracionales y propiedades electrónicas de estados moleculares excitados con un tiempo de vida corto.

En los experimentos de fotoemisión de moléculas en fase gaseosa se determinaban antaño cantidades promediadas sobre la orientación de la molécula, al ser imposible medir la orientación exacta de la misma en el momento de la fotoemisión de los electrones. En el último decenio, sin embargo, esta limitación se ha superado merced al desarrollo de refinadas técnicas experimentales: ahora se miden en coincidencia los electrones fotoemitidos y los fragmentos atómicos de la molécula, después de que ésta se disocie como consecuencia de la pérdida de neutralidad de carga. Ello permite determinar la orientación de la molécula en el preciso instante de la excitación del electrón. Se abre así una nueva y prometedora vía de investigación en el campo de la física molecular.

Se han realizado estudios detallados sobre la fotoemisión de electrones, sobre todo en CO, NO, N_2 y H_2, prestando especial atención a la distribución angular de los electrones emitidos y a su relación con la orientación de la molécula y la dirección de polarización de la luz incidente. Especial interés revisten los procesos de difracción del electrón fotoemitido al interaccionar con los átomos que conforman la molécula: bajo ciertas condiciones, se obtienen estados cuasiligados del electrón excitado, que "permanece" durante un tiempo en la cercanía de la molécula antes de ser emitido hacia el detector.

Veamos qué ocurre en la molécula de deuterio (D_2). Se trata de una de las moléculas más sencillas de la naturaleza: consta sólo de dos núcleos, dotados cada uno de una unidad de carga positiva y dos electrones. El átomo de helio, la molécula de hidrógeno y otros sistemas simples se han venido utilizando como modelos en el estudio de la física cuántica desde hace casi un siglo. Sin embargo, quedan todavía un gran número de incógnitas por resolver, sobre todo en



Doble fotoionización de una molécula de deuterio. En esta imagen se representa la distribución angular de uno de los electrones fotoemitidos (*azul*); éste se emite en el plano que forman el eje de la molécula (*verde*) y la dirección de polarización de la luz incidente. (El otro electrón fotoionizado, de la misma energía, se emite en dirección perpendicular a este plano, pero su distribución angular no se muestra porque en el experimento se mide la emisión de sólo uno de los electrones.)

cuanto a los procesos de excitación y correlación electrónicas.

Uno de los procesos de absorción fotónica que tienen lugar en la molécula de D_2 provoca la ionización de sus dos electrones (doble fotoionización). Ello conlleva la disociación de los núcleos dotados de carga positiva, que se repelen debido a la interacción de Coulomb. El resultado global de este proceso es, por tanto, la fragmentación total de la molécula, o fotofragmentación, en sus cuatro elementos constituyentes: los dos electrones más los dos núcleos dotados de carga positiva:

$$h\nu + D_2 \rightarrow 2e^- + 2D^+$$

Debido a que la masa de los iones de deuterio es harto superior a la de los electrones, se considera que la posición de los núcleos no cambia durante la fotoionización; se asume, pues, que su movimiento posterior está determinado sólo por la repulsión coulómbica. Así, la medida experimental de la energía cinética con la que los iones de deuterio (D^+) llegan al detector proporciona información directa sobre la posición relativa de los núcleos en el momento de la fotoionización (o, en el lenguaje propio de la mecánica cuántica, sobre la función de onda vibracional).

La fotofragmentación completa de la molécula de D_2 se ha estudiado en fecha reciente en el Laboratorio Nacional Lawrence de Berkeley. Las medidas las han realizado el equipo de Thorsten Weber, en el marco de una colaboración internacional coordinada por Reinhard Dörner, de la Universidad de Frankfurt. A tenor de los resultados, destaca la dependencia que presenta la distribución angular de los electrones emitidos respecto de la orientación de la molécula, así como de la distancia entre los núcleos en el momento de la fotoionización.

Las distribuciones angulares de fotoemisión para un átomo aislado son dipolares, es decir, su eje de simetría es paralelo a la dirección de polarización de la luz. Ello varía en el caso de una molécula diatómica, debido a las características de la función de onda inicial y a la difracción que experimentan los electrones fotoemitidos al interaccionar con los dos núcleos.

La posición relativa de los núcleos de la molécula de deuterio influye en la función de onda electrónica, la inicial y la final. Sin embargo, la selección de la dirección de salida de los electrones fotoemitidos permite minimizar el efecto del movimiento nuclear sobre la función de onda electrónica final. Así, las diferencias entre los espectros angulares se convierten en una medida indirecta de la correlación electrónica sólo en el estado inicial, es decir, de las modificaciones que se producen en la función de onda inicial de los dos electrones de la molécula de D_2 como consecuencia de la vibración de los núcleos.

Estudios como el de la fotofragmentación de la molécula de D_2 demuestran el potencial que ofrecen las medidas de fotoemisión para ahondar en las interacciones electrónicas en sistemas con un número reducido de electrones y en otras cuestiones fundamentales de la mecánica cuántica que, todavía en los albores del siglo XXI, siguen sin poder descubrirse con exactitud.

RICARDO DÍEZ MUIÑO
Centro Internacional de Física de Donostia y Unidad de Física de Materiales,
Centro Mixto CSIC-UPV/EHU,
San Sebastián

Hemocromatosis hereditaria

El hierro no siempre es bueno

A pesar de la creencia generalizada de que un suplemento férrico resulta beneficioso para la salud, existe una enfermedad genética de notable frecuencia en la que una acumulación de hierro conlleva graves complicaciones e incluso la muerte, si no se trata a tiempo. Nos referimos a la hemocromatosis hereditaria (HH).

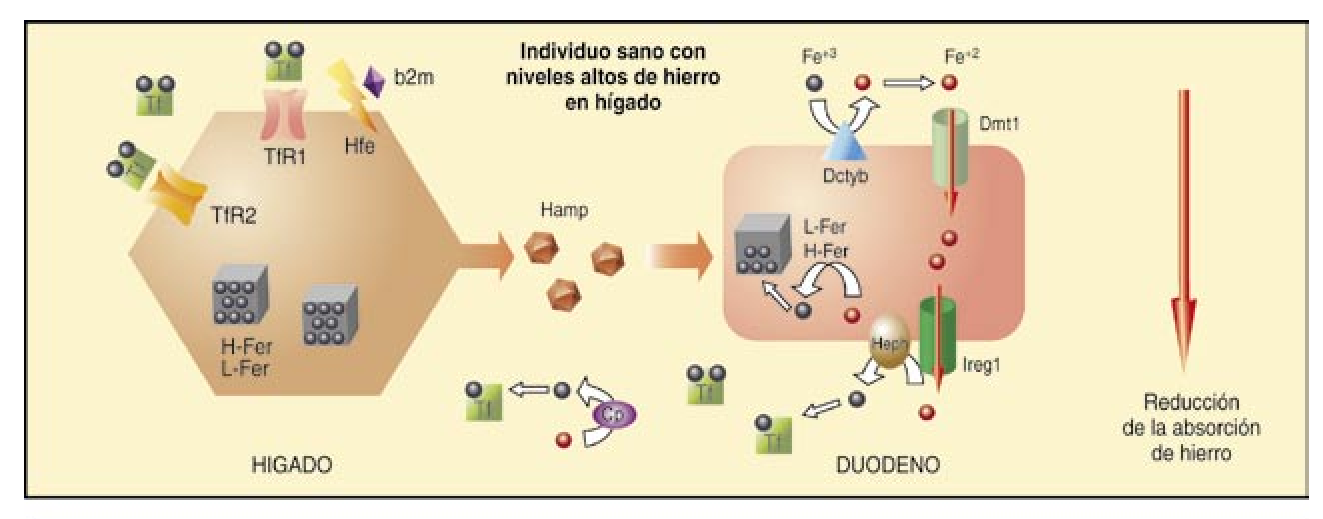
Este exceso de hierro puede deberse a mutaciones en distintos genes implicados en su metabolismo. Cada mutación da lugar a un tipo de HH (*véase la tabla*). El diagnóstico del trastorno se establece mediante la determinación de la saturación de transferrina y ferritina sérica, una biopsia hepática y el análisis de los genes cuya mutación provoca la enfermedad.

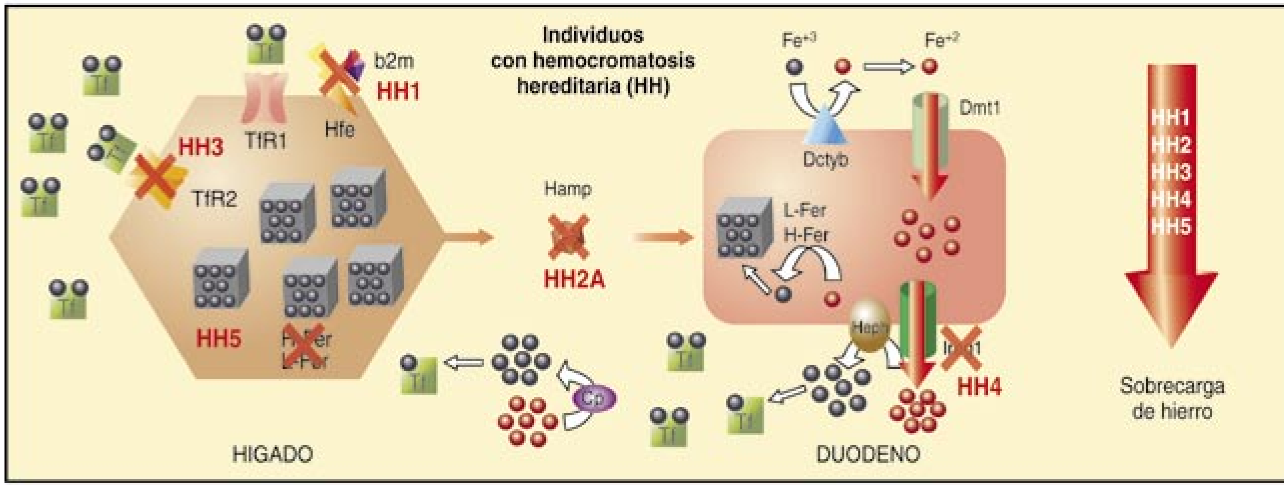
El tratamiento precoz de la HH se basa en la extracción de sangre (flebotomías), que elimina el exceso de hierro del organismo y mantiene unos niveles normales. Este tratamiento resulta efectivo y económico; carece de efectos secundarios y previene las complicaciones asociadas a la enfermedad. La sangre extraída de pacientes con HH puede emplearse en transfusiones. A los individuos que padecen talasemia o anemia refractaria grave y, por tanto, no toleran ese tratamiento, se les prescribe una terapia con quelantes de hierro.

La HH1 es la enfermedad genética de mayor frecuencia en Europa (afecta a uno de cada 200 individuos en el norte de Europa). Se da mayoritariamente en varones. Hasta los 50 o 60 años no se presentan los síntomas característicos: cirrosis hepática, diabetes, coloración bronceada de la piel, fallo cardíaco, artralgias, hipogonadismo y disminución de la libido. La cirrosis hepática puede progresar a carcinoma hepatocelular primario si la enfermedad no se trata a tiempo.

La HH2 o hematocromatosis juvenil afecta a ambos sexos por igual; presenta una clínica más grave, a una edad más temprana. Las características clínicas asociadas a la HH3 se parecen a las de la HH1. En la HH4 se produce una acumulación precoz de hierro en las células del sistema reticuloendotelial y un notable incremento de la ferritina sérica antes del incremento en la saturación de transferrina; los pacientes con HH4 no suelen tolerar la terapia por flebotomía, ya que desarrollan anemia. La HH5 se ha descrito en una familia japonesa.

Los mamíferos obtienen hierro, a través de la dieta, en forma de hierro libre o de hierro asociado al grupo hemo. La enzima reductasa DyctB reduce el hierro libre de férrico (Fe^{+3}) a ferroso (Fe^{+2}) en el lumen del duodeno (zona proximal del intestino delgado); el transportador Dmt1 lo introduce en el enterocito. El hierro asociado al grupo hemo se absorbe





mediante un transportador todavía por identificar y se separa del grupo hemo en el interior del enterocito. Una vez en el interior de esta célula, el hierro puede almacenarse en forma de ferritina, perderse tras la descamación del enterocito senescente o exportarse al plasma mediante el transportador Ireg1 (mutado en la HH4). Este último proceso requiere de la oxidación de Fe^{+2} a Fe^{+3} mediante la hephaestina (Heph).

En cuanto el hierro ha llegado al torrente circulatorio, no existen mecanismos fisiológicos de importancia que conlleven una pérdida del mismo, salvo la menstruación. Con otras palabras, la absorción del elemento requiere una regulación precisa, pues sin ella se produce un desequilibrio en el nivel del mismo (anemia o hemocromatosis).

El hierro que llega a la sangre se une a la transferrina (Tf) circulante en forma de Fe^{+3}; pasa luego por el sistema portal del hígado, su lugar principal de almacenamiento. Los hepatocitos capturan la Tf férrica por un proceso en el que interviene el receptor de transferrina (TfR1), aunque en mayor cantidad a través del receptor de transferrina 2 (TfR2, mutado en la HH3).

El mayor consumo de hierro se produce en la médula ósea, donde se absorbe vía TfR1 en los precursores de los eritrocitos para utilizarlo en la síntesis del grupo hemo, que se incorpora en su mayor parte a la hemoglobina.

El hierro que contiene el grupo hemo se recicla en la ingestión de los eritrocitos senescentes; de ello se encargan los macrófagos reticuloendoteliales. El hierro de los macrófagos se retiene (almacenado en la ferritina) o se expulsa al plasma, donde se oxida por la acción de la ceruloplasmina (Cp), y se transporta vía Tf para su reutilización. El hígado y el sistema reticuloendotelial constituyen, pues, los sitios principales de movilización de hierro.

Las células intestinales obtienen la información acerca de los niveles de

Hemocromatosis hereditarias	Gen mutado	Localización cromosómica	Principales mutaciones	Tipo de herencia	OMIM[1]
HH1	*HFE*	6p21	C282Y, H63D	Recesiva	235200
HH2A o juvenil	*HAMP*	19q13	93delG, R56X	Recesiva	602390
HH2B o juvenil	*HJV*	1q21	G320V	Recesiva	602390
HH3	*TFR2*	7q22	Y250X, E60X, M172K, delAVAQ	Recesiva	604250
HH4	*IREG1*	2q32	A77D, N144H, V163del	Dominante	606069
HH5	*H-Fer*	11q13	A49U	Dominante	134770

[1] OMIM *Online Mendelian Inheritance in Man*

hierro a través de la proteína hepcidina (Hamp), un péptido sintetizado en el hígado que presenta un efecto regulador negativo en la absorción del hierro: cuanta más Hamp, menos absorción de hierro y viceversa. Recientes descubrimientos han identificado a la proteína Ireg1 (mutada en la HH4) como el receptor de la proteína Hamp (mutada en la HH2A).

La proteína Hfe (mutada en la HH1) se asocia con la beta-2microglobulina (beta-2m) y compite con la Tf por unirse al TfR1 en la superficie de las células hepáticas. La mutación C282Y impide la interacción de Hfe con beta-2m y el transporte a la superficie celular del complejo Hfe-beta-2m. La mutación H63D afecta a la competencia de Hfe por la unión a TfR1.

En un individuo sano con una concentración de hierro en hígado muy alta, se segrega Hamp al torrente sanguíneo. Con ello se bloquea la absorción de hierro en el duodeno. En un individuo con HH, las mutaciones en los genes *HFE* (HH1), *HAMP* (HH2A), *HJV* (HH2B), *TFR2* (HH3), *IREG1* (HH4) o *H-FER* (HH5) alteran este sistema de regulación. Pese a un nivel de hierro elevado, la absorción prosigue, generándose una sobrecarga.

La investigación realizada por el grupo de Matthias Hentze, del Laboratorio Europeo de Biología Molecular (EMBL), con ratones deficientes en la proteína Hfe ha demostrado que el aumento en la expresión de Hamp, en respuesta a una sobrecarga de hierro, depende de Hfe. Apunta, además, que también la reductasa DyctB se hallaría involucrada en el aumento de la absorción del hierro. Los próximos trabajos sobre el metabolismo del hierro habrán de desentrañar el mecanismo mediante el cual Hamp bloquea la absorción de hierro en las células intestinales.

MAYKA SÁNCHEZ
Laboratorio Europeo de Biología Molecular (EMBL), Heidelberg

BELÉN MIÑANA
Fundación Centro de Regulación Genómica (CRG), Barcelona

La densidad mineral ósea

Importancia metodológica

En ocasiones, el desarrollo técnico en un área tiene consecuencias inesperadas para el avance de las investigaciones en otras. Es el caso de las técnicas utilizadas para medir la densidad mineral ósea. Aunque se diseñaron para establecer diagnósticos clínicos, en las investigaciones arqueológicas y paleontológicas constituyen un instrumento metodológico importante, que permite validar algunas inferencias acerca del pasado.

La densidad mineral ósea es la cantidad de contenido mineral de un hueso —o fracción de hueso— por unidad de volumen. Explica en parte la resistencia de cada porción esquelética a los factores de destrucción. Su importancia para las disciplinas científicas mencionadas puede apreciarse si se considera que los registros fósiles —arqueológicos y paleontológicos— sólo se forman si por lo menos algunos de los huesos no se reciclan. Los huesos que poseen una mayor densidad mineral tienden a conservarse mejor, mientras que los de menor densidad se destruyen más fácilmente.

La disciplina científica que se ocupa de los procesos de preservación y de destrucción de los restos orgánicos es la tafonomía. En las últimas décadas, ha cobrado gran importancia en los estudios arqueológicos, paleontológicos y paleoecológicos en general, debido a que toda la información sobre los ecosistemas y organismos del pasado depende de las características tafonómicas de los conjuntos fósiles particulares.

Un tema importante en las investigaciones tafonómicas de los últimos años ha sido la forma en que las propiedades intrínsecas de los huesos y carcasas de diversas especies influyen en la correspondiente conservación. Los huesos de cada grupo de vertebrados presentan propiedades específicas, en función de la gran diversidad que existe en el tamaño corporal, la morfología del esqueleto y la microestructura ósea. Estas son variables que influirán en la destrucción o conservación de los restos de cada grupo taxonómico.

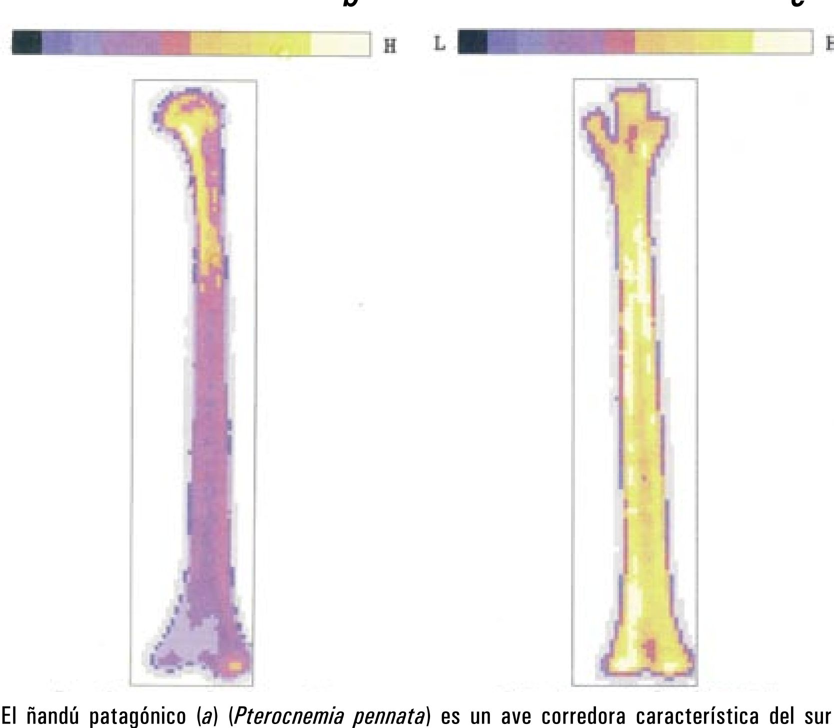
La variedad y cantidad de huesos presentes en un registro óseo recibe la denominación de abundancia anatómica o representación de partes esqueléticas, mientras que el repertorio de especies representado es conocido como abundancia taxonómica. Ambas variables son centrales para el análisis de restos fósiles, y los estudios densitométricos, enmarcados en las investigaciones tafonómicas, son una de las vías para efectuar un análisis adecuado desde el punto de vista metodológico. Los estudios de densitometría ósea incluyen estimaciones específicas para cada grupo de organismos, con las que cabe analizar por qué los restos de algunas especies y algunas partes esqueléticas se preservan mejor.

El estudio de los cazadores y recolectores actuales ha mostrado que existe una amplia gama de conductas humanas que afectan a la representación de especies y de partes esqueléticas. Las decisiones acerca de qué animales cazar y qué partes de los mismos transportar desde el lugar de obtención hasta el de su consumo, el compartir las presas obtenidas y la distribución de sus partes anatómicas entre unidades familiares diferentes, las modalidades y técnicas de preparación de alimentos o la explotación de algún producto específico como la médula ósea, así como el intercambio entre grupos sociales, pueden mencionarse entre los factores más relevantes.

La causa de muerte y muchos otros procesos operantes en el lapso que precede al enterramiento, junto con las características morfológicas y estructurales de los huesos, serán los que determinen las situaciones particulares de preservación de un organismo o parte de él.

Con el fin de contar con los valores apropiados para cada grupo de organismos, en el curso de las últimas décadas se han efectuado mediciones de la densidad ósea en esqueletos correspondientes a diversos animales, entre los que se incluyen mamíferos terrestres y marinos, aves y peces. Para cada uno de los taxones estudiados, se obtuvieron los valores correspondientes a cada hueso de un esqueleto, así como para las distintas porciones que conforman un elemento óseo particular.





El ñandú patagónico (*a*) (*Pterocnemia pennata*) es un ave corredora característica del sur de Sudamérica, una de las presas de los habitantes prehistóricos de la región. En diversos yacimientos arqueológicos predominan los huesos de la porción inferior de las extremidades posteriores de estas aves. Los valores de densidad mineral obtenidos para la especie permitieron establecer que esta particular representación de partes esqueléticas es concordante con una mayor cantidad de contenido mineral en el tibiatarso (*b*) y el tarsometatarso (*c*), de los cuales puede observarse la imagen provista por el densitómetro. Debido a que poseen valores de densidad altos con relación a otros elementos del esqueleto, se encuentran entre los que tienen mayores probabilidades de conservarse. El particular patrón de conservación observado no debe, por lo tanto, atribuirse directamente al comportamiento humano: puede ser el resultado de la atrición dependiente de la densidad.

Independientemente del taxón involucrado, la diáfisis, o parte central, de los huesos presenta de ordinario valores de densidad mineral más altos que las correspondientes epífisis, o extremos del hueso. Esto implica que las diáfisis pueden tener mayores probabilidades de sobrevivir a la destrucción ligada a la densidad. Este resultado es concordante con una mayor presencia de diáfisis en muchos conjuntos arqueológicos y plantea un serio problema metodológico. Las epífisis de los huesos son las que presentan rasgos diagnósticos más claros para la identificación de partes esqueléticas específicas, por lo que se las utiliza para efectuar las determinaciones anatómicas y taxonómicas en elementos del esqueleto poscraneal. Sin embargo, debido a que en general las epífisis poseen valores de densidad mineral menores a los de las diáfisis correspondientes, son las porciones de los huesos que tienen menores posibilidades de preservación.

Los primeros estudios densitométricos desarrollados en el marco de las investigaciones tafonómicas utilizaron la densitometría fotónica, que sólo brinda parte de los valores básicos necesarios para estimar la densidad mineral de un hueso específico. El densitómetro de fotones mide el contenido mineral total por área de hueso, expresando el resultado final en g/cm^2; provee además los valores correspondientes al peso del mineral (en g) y la superficie barrida (en cm^2). Debe determinarse el valor final, dividiendo los valores de contenido mineral óseo de cada parte esqueletaria —provistos por el densitómetro y expresados en g— por su volumen, que se mide aparte. Este método tropezaba con problemas, dada la dificultad de estimar el área de la sección medida (su profundidad y ancho), valores necesarios para calcular los valores de la densidad mineral. Por otro lado, al no poder considerar las cavidades medulares en los cálculos, los valores finales alcanzados subestiman el contenido mineral de algunos huesos y sobreestiman el de otros. En síntesis, los estudios de densitometría fotónica no podían distinguir la heterogeneidad interna de la estructura de los huesos, por lo que los valores de densidad que aportaban no permitían una correcta estimación del rol que cumple esta propiedad en la destrucción o conservación de los huesos.

Durante los últimos años, esta dificultad se subsanó de dos maneras. Varios investigadores continuaron utilizando los valores provistos por los densitómetros fotónicos, pero lograron superar el problema de las cavidades medulares midiendo el volumen por desplazamiento de agua, ajustando de esta manera los valores obtenidos y brindando una medida válida para el análisis tafonómico. Otro grupo comenzó a utilizar la tomografía computerizada, que también permite evaluar de manera apropiada las cavidades medulares y la morfología general de los huesos. Ambas opciones metodológicas permiten mejores estimaciones de los valores de densidad mineral y, por lo tanto, evaluaciones más exactas de la resis-

tencia a la destrucción por factores que dependen de la densidad.

Un caso que permite apreciar la forma en que los valores de densidad se utilizan para el análisis de restos arqueológicos es el de los ñandúes (*Pterocnemia pennata* y *Rhea americana*), aves corredoras del sur de Sudamérica.

Los viajeros de los siglos XVIII y XIX relatan que la caza de estas aves era muy importante para los indígenas de la Pampa y la Patagonia, ya fuese como parte de su subsistencia o para su uso con fines comerciales (la venta, por ejemplo, de plumas en el mercado colonial). Sin embargo, sus restos en los sitios arqueológicos desde fines del Pleistoceno (los últimos 12.000 años) son muy escasos. El problema, entonces, es dilucidar si la ausencia de huesos de ñandú en los registros arqueológicos se debe a que estas aves no fueron presas habituales de los cazadores humanos o si es el resultado de procesos de destrucción. Otro tema relacionado es que en los yacimientos en los que aparecen restos de ñandú, la representación anatómica es particular, ya que predominan los elementos correspondientes a la porción inferior de las extremidades posteriores. Las primeras interpretaciones de esta representación de partes esqueléticas proponían que la misma era el resultado del descarte de las extremidades posteriores en los sitios de caza, debido a que sólo se transportaban hasta los campamentos aquellas porciones con mayor contenido cárnico. Sin embargo, no todos los investigadores concordaban con esta interpretación y fue necesario realizar estudios tafonómicos que resolviesen la controversia.

Los estudios tafonómicos incluyeron dos aspectos: 1) observaciones destinadas a establecer la forma en que se destruyen o conservan los restos de estas aves en contextos naturales y 2) estudios densitométricos.

Las observaciones actuales constituyen una de las formas más fructíferas de entender la manera en que los procesos tafonómicos afectan a los restos orgánicos, ya que permiten establecer cuáles son las relaciones que existen entre procesos geobiológicos y conjuntos de huesos contemporáneos a los mismos. La observación directa de los procesos tafonómicos y las trazas que los mismos dejan en los restos orgánicos es un instrumento interpretativo eficiente para analizar conjuntos de huesos fósiles. Los estudios realizados para resolver el problema de los ñandúes se llevaron a cabo en diferentes localidades de la Patagonia, y permitieron establecer que los huesos de estas aves que mejor sobreviven a la acción de los procesos tafonómicos son los correspondientes a las extremidades posteriores. Es decir, la abundancia anatómica observada en los restos derivados de muertes naturales de estas aves es coincidente con la detectada en los yacimientos. Esto implica que dos procesos diferentes, la mortalidad natural y la acción humana, pueden resultar en un mismo patrón de representación de partes esqueléticas.

Gracias a los estudios densitométricos se completaron las observaciones efectuadas, ya que brindaron valores de densidad que establecieron que los huesos de las extremidades posteriores se encuentran entre los que presentan valores de densidad más altos. Por lo tanto, son los que tienen mayores probabilidades de conservarse frente a una amplia gama de procesos tafonómicos.

Como consecuencia de la obtención de los valores densitométricos, se determinó que la "abundancia anatómica" de restos de ñandú presentes en muchos de los depósitos arqueológicos de Sudamérica no puede atribuirse directamente a un comportamiento humano específico (el transporte de partes de una presa y el descarte de otras), sino que puede ser el resultado de un gran número de procesos, en los que la destrucción dependiente de la densidad mineral tiene el papel preponderante.

En conclusión, a lo largo de las últimas décadas la densitometría ósea ha probado ser un instrumento eficiente y valioso para las investigaciones tafonómicas, arqueológicas y paleontológicas, ya que constituyen el punto de partida para analizar la influencia de las propiedades intrínsecas de los huesos en la conformación de los conjuntos fósiles.

ISABEL CRUZ
Unidad Académica Río Gallegos
Universidad Nacional
de la Patagonia Austral



Francesc Peters

Búsqueda de alimento en un desierto de agua

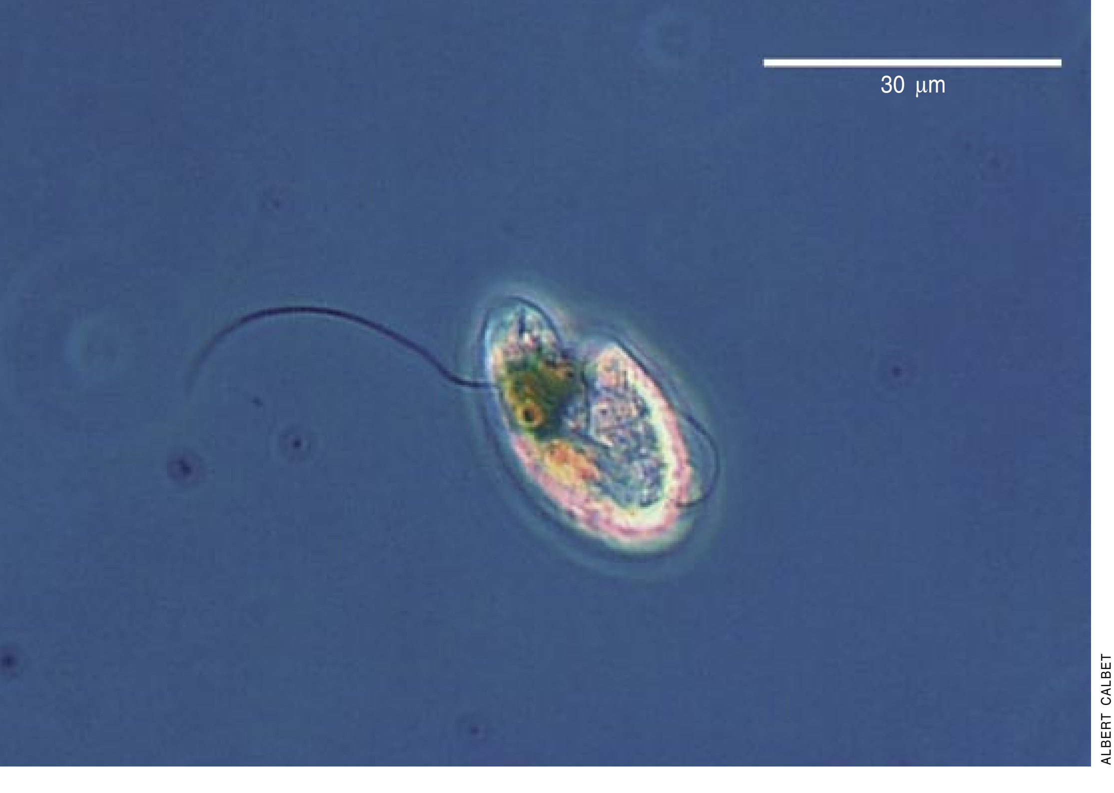
Dada la cantidad y variedad de organismos que medran en el mar, a menudo empleamos la metáfora de la sopa para designarlo. Una cucharadita de agua marina contiene un millón de bacterias y unos centenares de protozoos que se alimentan de ellas. Sin embargo, cada bacteria está separada de sus semejantes por una distancia equivalente a 350 veces su tamaño (en nuestro caso, sería como si no tuviéramos a ningún congénere a menos de medio kilómetro). Se trata, por tanto, de una sopa diluida. Para estos microorganismos, el mar viene a ser un *desierto de agua*.

En estas condiciones, al depredador microscópico le cuesta abatir su presa, sobre todo si sólo la detecta cuando se encuentra muy próxima a él. Varios protistas han desarrollado estrategias alternativas para conseguir alimento. Algunos, mediante corrientes de filtración, vacían de contenido particulado el agua circulante. Otros se establecen sobre alguna superficie y acechan a las presas que vagan cerca, ahorrándose así la energía que consumirían si hubieran de moverse en su búsqueda.

Los protistas que nadan libremente en busca de alimento deben optimizar su tarea. Para ello recurren a una de las opciones más utilizadas en la naturaleza: los vuelos de Lévy. Alternan la búsqueda de presas en un área restringida con largos desplazamientos ocasionales para trasladarse a otras zonas de caza.

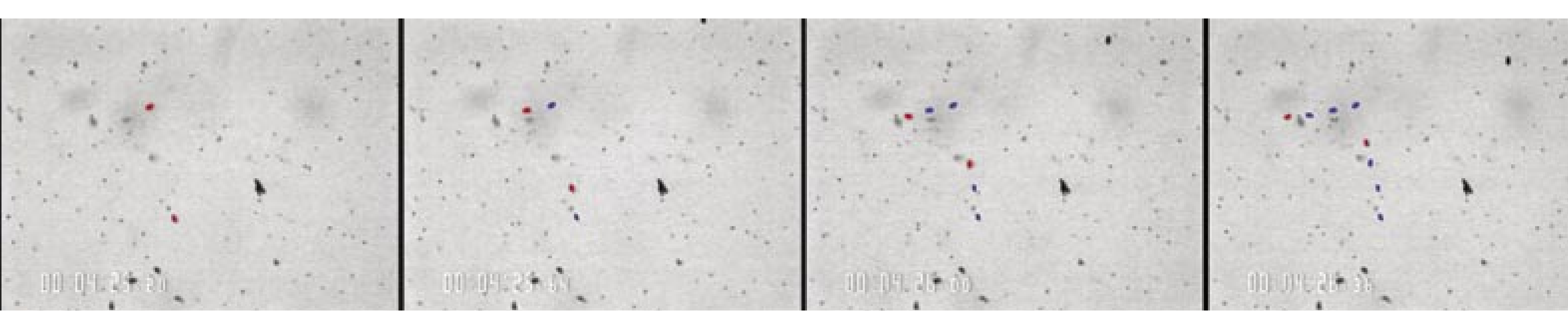
Oxyrrhis marina constituye uno de estos depredadores microscópicos. Se trata de un dinoflagelado heterotrófico que ingiere partículas de diversos tamaños. Aunque acostumbra medrar cerca de la superficie, donde abundan las presas, es un nadador excepcional. A tenor de su capacidad, cabría pensar que, en pocas generaciones, *O. marina* agotaría el medio microscópico marino. Pero ocurre que nuestro dinoflagelado constituye un bocado apetitoso (un “tropezón” en la sopa) para depredadores de mayor tamaño. Así se teje la red trófica de este ecosistema.

1. Cada bacteria marina está separada de sus semejantes por una distancia equivalente a 350 veces su tamaño. Para estos microorganismos, el mar viene a ser un *desierto de agua*.



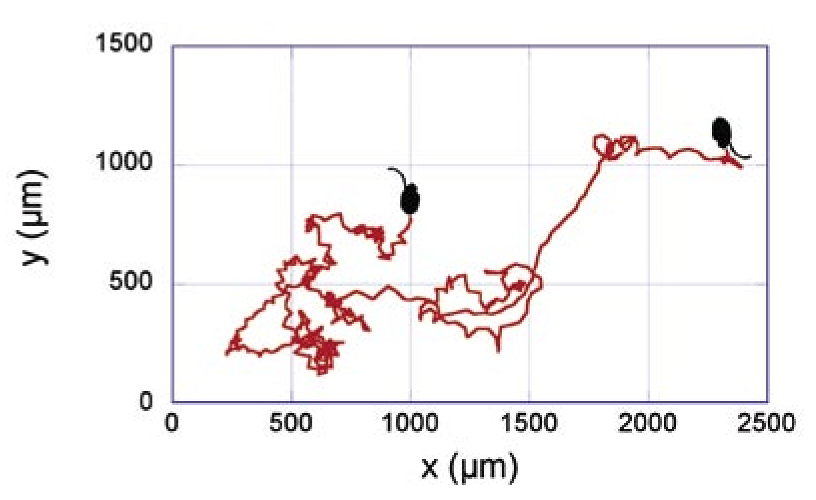
ALBERT CALBET

2. *Oxyrrhis marina*. Dinoflagelado unicelular heterotrófico visto al microscopio óptico con contraste de fases. Se sirve del flagelo para propulsarse en el agua.



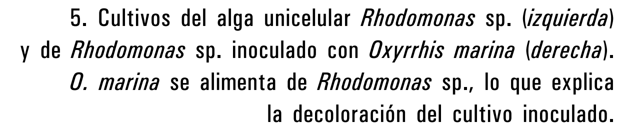
3. Microfotografías que ilustran el movimiento de *Oxyrrhis marina*. A partir de esas instantáneas se calculan velocidades de natación así como ángulos y frecuencias de giro. Los puntos de menor tamaño corresponden a las presas: *Rhodomonas* sp.

FRANCESC PETERS



4. Esquema del movimiento de *Oxyrrhis marina* obtenido a partir de filmaciones en un microscopio estereoscópico. Se observan trayectorias casi rectilíneas, que unen áreas de búsqueda recurrente. El desplazamiento se realiza en 72 segundos. (La representación del organismo, que aparece al inicio y final de la secuencia, no se halla a escala.)

FRANCESC PETERS



5. Cultivos del alga unicelular *Rhodomonas* sp. (*izquierda*) y de *Rhodomonas* sp. inoculado con *Oxyrrhis marina* (*derecha*). *O. marina* se alimenta de *Rhodomonas* sp., lo que explica la decoloración del cultivo inoculado.



Los quipus incas

Los libros de contabilidad incas constaban de ristras de cordeles anudados. Su sistema de codificación numérica ya no tiene secreto, pero el contenido literario sigue siendo un enigma

Loïc Mangin

En 1532 estalló la guerra entre los dos hermanos y enemigos incas Atahualpa, instalado en Quito, y Huáscar, de Cuzco. Este conflicto fratricida, consecuencia de la división del Imperio a la muerte de Huayna Cápac, padre de ambos, acontecida siete años antes, iba a precipitar la caída de la civilización incaica, porque ese mismo año el español Francisco Pizarro desembarcaba en las costas ecuatorianas con planes de conquista. La debilitación del Imperio y las disensiones internas le facilitaron grandemente la tarea.

Algunos años más tarde, Garcilaso el Inca, historiador y poeta mestizo, aprendió la lengua de los indígenas y recorrió el imperio colonizado, para recopilar sus tradiciones. Según su descripción, los indios, cuando iban a Cuzco a pagar sus tributos a los nuevos amos llegados del Viejo Mundo, tejían hilos, de uno o varios colores, en los que escribían números mediante nudos. Luego, estos hilos se enfilaban ordenadamente a lo largo de un cordón principal, a modo de flecos. Estos dispositivos de numeración corresponden a los quipus ("quipu" significa "nudo" en quechua, la lengua de los incas); amén de su contenido numérico, habrían sido depositarios también de información literaria. Sobre esta descodificación no existe todavía consenso entre los expertos. Describiremos aquí las hipótesis que éstos defienden.

En el imperio inca no se conocía la escritura. En una sociedad en la que todo estaba minuciosamente organizado e inventariado de forma metódica, los quipus constituían el único medio de transporte de información. Se utilizaban para la administración del estado: censos, inventarios, producción minera, composición de la mano de obra, etcétera. Cada quipu



LOÏC MANGIN

operaba como un auténtico libro de contabilidad.

Pero, además de recursos materiales y humanos, en los quipus se registraban también efemérides, baladas, leyes o tratados de paz. Volveremos más adelante a ocuparnos del contenido no numérico de los quipus, todavía motivo de controversia.

Un servicio de correo a caballo transportaba los mensajes a través de una red viaria. El sistema funcionaba de forma similar al *Pony express* (la primera línea de correo exprés estadounidense, inaugurada en 1860, que operaba entre Missouri y California): los jinetes se relevaban de posta en posta hasta el destino final.

Sólo los administradores, o quipucamayocs ("guardianes de los quipus"), conocían la clave de estos libros de contabilidad. La mayoría de los quipus depositados en Cuzco o en las provincias fueron destruidos por los generales de Atahualpa y, más tarde, por los funcionarios reales, que obedecían las órdenes del virrey Francisco de Toledo de acabar con las tradiciones. Otros quipus se utilizaron para encender las hogueras donde los sacerdotes quemaban los ídolos y todos los objetos de culto.

Anatomía de un quipu

Los escasos ejemplares (unos 500) que todavía se conservan en los museos se han hallado en yacimientos funerarios, pues los incas se enterraban con todos los objetos que habían utilizado en vida. Veamos de qué modo se codifica en un quipu la información numérica.

Garcilaso fue preciso en sus observaciones: un quipu consta de una cuerda gruesa, la principal, a la que se atan varias cuerdas más, de 20 a 50 centímetros de longitud. Un quipu puede contener hasta 2000 cuerdas. Al extenderlo sobre un plano horizontal, unas de estas cuerdas, las inferiores, quedan orientadas en un sentido, mientras que las superiores se orientan en el sentido contrario (las ataduras están tan prietas, que no cabe duda sobre la orientación de las cuerdas). Una tercera categoría de cuerdas, las secundarias, se atan a las superiores o inferiores.

La mayoría de las cuerdas tienen nudos. ¿Cuál es su significado? A pesar de las informaciones recogidas por los cronistas españoles, hasta 1912 no se resolvió el misterio. Veamos la descripción que Leland Locke hizo de un quipu del Museo de Historia Natural de Nueva York.

Merced a los escritos de Garcilaso, Locke sabía que el valor de los números codificados por los nudos dependía de la posición de éstos a lo largo de cada una de las cuerdas. Contienen éstas tres grupos de nudos: un grupo inferior, que Locke atribuye a las unidades, uno central, que corresponde a las decenas y, por fin, un grupo cercano a la cuerda principal para las centenas.

Su hipótesis se confirma cuando observa que el número codificado en cada cuerda superior coincide con la suma de los números codificados en el grupo de cuerdas inferiores correspondiente.

Tres tipos de nudos

La representación de los números en los quipus guarda semejanza con nuestro sistema posicional de base 10. Recordemos sus características principales. Nosotros disponemos de 10 símbolos: los dígitos que van del 0 al 9. En un número, pongamos el 6489, por ejemplo, cada cifra corresponde al coeficiente de una potencia de 10, cuyo exponente es 0 ($10^0 = 1$) para la cifra situada en la posición derecha extrema y aumenta en una unidad cada vez que nos desplazamos un puesto hacia la izquierda. Así, 6489 es igual a $6 \times 10^3 + 4 \times 10^2 + 8 \times 10^1 + 9 \times 10^0$, es decir, 6000 + 400 + 80 + 9. Cabe señalar que el sistema posicional no está vinculado sólo a la base 10. Los mayas, por ejemplo, contaban en el sistema vigesimal, es decir, en base 20, y se servían también de un sistema posicional.

En los quipus aparecen sólo tres tipos de nudos, a saber: simples, largos (un nudo simple al que se le dan varias pasadas por el interior del lazo antes de cerrarlo) y en ocho. En una cuerda, los nudos se organizan en grupos de uno a nueve (volvemos a encontrar nuestras 9 cifras, excluido el 0); a cada grupo se le asigna una potencia de 10, que aumenta conforme nos acercamos a la cuerda principal.



MUSEO LARCO, LIMA, PERU

1. RUINAS DE UNA FORTALEZA INCA (*izquierda*), en Ingapirca, Ecuador. Los recursos, humanos y alimentarios, se administraban, igual que en todo el imperio, mediante unos originales libros de contabilidad: los quipus (*derecha*). En estos instrumentos, compuestos por cuerdas, los números se codificaban mediante nudos. Sólo los quipucamayocs, los guardianes de los quipus, conocían las reglas de confección de los mismos.

Las unidades suelen estar representadas por nudos largos, cuyo número de vueltas indica el número de unidades; las otras potencias de 10 aparecen representadas por nudos simples. Cuando se trata de codificar una sola unidad, en cambio, se recurre a un nudo en ocho para evitar confusiones (un nudo largo de una sola vuelta equivale a un nudo simple).

El cero se representa por la ausencia de nudo en un grupo (grupo nulo). El tipo de nudo facilita la identificación de las unidades; los grupos de nudos se hallan alineados en la misma posición en todos los cordeles, lo que agiliza la localización de las posiciones desprovistas de nudos. Además, dado que la representación de las unidades resulta inequívoca, en ocasiones se observan varios números escritos en una misma cuerda.

La descodificación que acabamos de exponer se limita al aspecto numérico. Hasta la fecha, nadie la ha contradicho. ¿Qué ocurre, en cambio, con la expresión de hechos e ideas? El debate dista de estar concluido. De nuevo, los cronistas y, entre ellos, en primer lugar, el Inca Garcilaso, nos ofrecen algunas indicaciones. Según el historiador mestizo, el significado extranumeral de los cordeles vendría dado por los colores, al ser algunos hilos de un solo color, otros de dos, de tres, e incluso más. Los colores simples y sus combinaciones encerrarían cada uno su propio significado.

Dos hipótesis

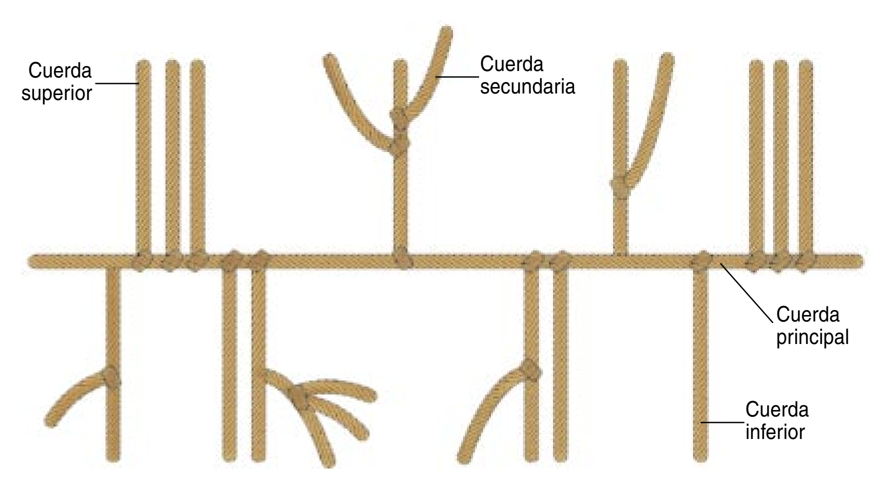
En algunos quipus se ha identificado un registro de municiones. Las combinaciones de colores indican las armas por orden jerárquico: en la primera cuerda, las más nobles, como las lanzas; después, en la segunda, los dardos; a continuación los arcos y las flechas; y así hasta las mazas, las hachas y las hondas.

El sentido de torsión de los hilos de la cuerda tendría también significado. Las cuerdas cuyos hilos girasen hacia la derecha representarían conceptos positivos, mientras que las cuerdas hiladas a izquierdas tendrían un sentido negativo.

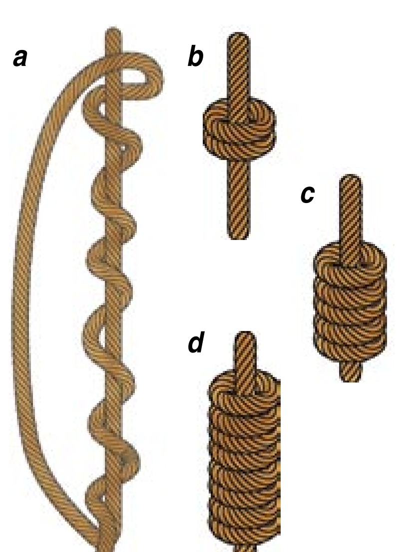
El misterio de la ausencia de escritura quedaría resuelto de hallar significado a la orientación en la que se torció la cuerda; pues, ¿cómo es posible que una civilización de suma complejidad, cuyo poder se extendía sobre el territorio que hoy abarca Perú, Bolivia, Ecuador y el norte de Chile y de Argentina, pudiera prescindir de la escritura? Sería tan impensable como una Grecia sin lengua.

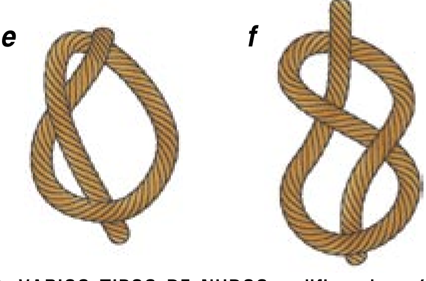
Gary Urton, de la Universidad de Harvard, cree haber desvelado un lenguaje en código binario transcrito en las cuerdas de los quipus. Se trataría de un sistema completamente inédito (hoy es todavía objeto de debate) y radicalmente distinto de nuestro sistema de escritura. Según Urton, cada nudo sería el resultado de una sucesión de seis decisiones (los arqueólogos del Neolítico hablarían de "cadenas operatorias"). ¿Ha de hacerse el nudo con pelo de llama o lana de oveja? ¿Ha de ir una cuerda en la parte superior o en la inferior? ¿Deben ser azules o rojos sus hilos? En lo referente a los colores, Urton utiliza la terminología y el simbolismo de los tejedores bolivianos, que distinguen 24 colores.

Este antropólogo diferencia, en total, seis decisiones binarias y una de opciones múltiples (el color). En definitiva, el repertorio informativo de un quipu constaría de $2^6 \times 24 =$ $= 1536$ signos, un repertorio de mayor extensión que el de la escritura cuneiforme mesopotámica o el de los jeroglíficos egipcios. Un quipu abarcaría, pues, más que un mero recordatorio. Urton llevará a cabo la informatización de todos los detalles de los quipus disponibles. Pretende, además, hacer accesibles tales datos



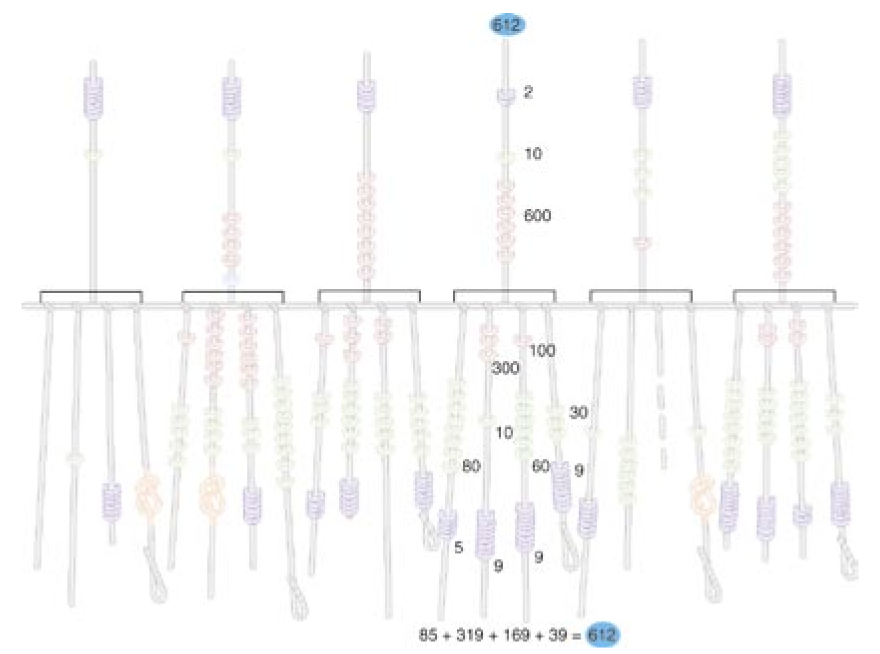
2. UN QUIPU consta de una cuerda principal a la que se ligan fuertemente cuerdas laterales: unas inferiores y otras superiores. Por último, cuerdas secundarias se atan a estos dos últimos tipos de cuerdas.





3. VARIOS TIPOS DE NUDOS codifican los números en un quipu. Los largos (*a*) representan las unidades: el número de vueltas equivale al número de unidades (dos en *b*, cinco en *c*, y ocho en *d*). Los simples representan las otras potencias de 10 (*e*). Los nudos en ocho (*f*) se utilizan para indicar una unidad (un nudo largo de una sola vuelta equivaldría a un nudo simple y, por tanto, se prestaría a confusión).

POUR LA SCIENCE



4. LA CLAVE DE LA NUMERACION INCA se ha descifrado merced a la labor de Leland Locke. Los incas contaban en base 10, siguiendo un sistema posicional. Los nudos largos (*violeta*) representaban las unidades, situándolas en la extremidad de la cuerda. Una unidad sola se denotaba mediante un nudo en ocho (*naranja*), para diferenciarla de los nudos simples que correspondían a las otras potencias de 10 (las decenas, en *verde*; las centenas, en *rojo*; los millares, en *azul*). A cada una de ellas le corresponde un grupo de nudos; las potencias de 10 aumentan desde el extremo hacia la cuerda principal. El número codificado en cada cuerda superior corresponde a la suma de los números codificados en el grupo de cuerdas inferiores correspondiente.

a cuantos deseen estudiar y descifrar el código.

En junio de 2003, Carrie Brezine, tejedora y matemática, proporcionó una copia de las transcripciones de unos quipus descubiertos delante de una caverna situada sobre el lago de los Cóndores, en el norte de Perú. Largas series de nudos aparecían, casi idénticas, en tres de los quipus; ello indicaba que la información se había copiado de uno a otro, igual que los monjes copistas de la Edad Media reproducían los manuscritos.

Laura Laurencich Minelli, de la Universidad de Bolonia, aboga también por la existencia de un significado no numérico en los quipus. En fecha reciente, ha descrito un manuscrito del siglo XVII, atribuido a Joan Antonio Cumis y a Joan Anello Oliva, que encerraría información detallada sobre los "quipus literarios". En el documento de estos dos jesuitas estaban intercaladas tres páginas de dibujos firmados por Blas Valera y un sobre que contenía un fragmento de un quipu. Según Cumis, ciertos quipus, los de la realeza, se distinguirían de los destinados a la contabilidad. Sin embargo, pocos de ellos habrían sobrevivido a los "autos de fe" de la Inquisición española.

Respecto de la forma en que el quechua se escribía mediante nudos, Cumis señala que: "La rareza de las palabras y la posibilidad de modificar un mismo término mediante partículas o sufijos ha permitido a los incas la confección de un diccionario sin papel, ni tinta, ni pluma [...]. Mi interlocutor elaboró luego la lista de las palabras principales, así como la forma de codificarlas en un quipu".

Quizá nos hallemos todavía lejos de comprender la interpretación que los quipucamayocs hacían de los quipus. Hasta la fecha, sólo se han descifrado con certeza las reglas numéricas; queda por desvelar el misterio de las combinaciones de símbolos, colores y posiciones.

Bibliografía complementaria

MATHEMATICS OF THE INCAS: CODE OF THE QUIPU. Marcia y Robert Ascher. Edición Dover, 1997.

CRACKING THE KHIPU CODE. Charles Mann, en *Science*, vol. 300, n.º 5626, págs. 1650-1651; 2003.

Microchorros y nanochorros

Chorros de diámetro micro y nanométrico ofrecen nuevos métodos para la obtención de micro y nanocápsulas, nanofibras, nanotubos, nanoemulsiones y otras estructuras de interés técnico

Antonio Barrero, Ignacio González Loscertales, Manuel Márquez

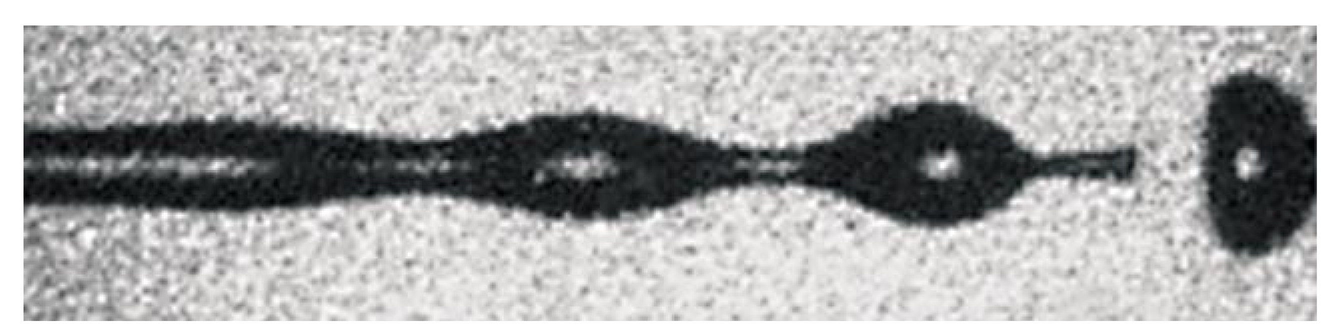
Fue Richard P. Feynman, en su famosa conferencia *There's plenty of room at the bottom*, pronunciada a finales de la década de los cincuenta del siglo pasado, el primero en atraer el interés de físicos e ingenieros hacia el mundo de lo minúsculo: el de la dimensión submicrométrica. Como otras veces antes, Feynman, premio Nobel de física, pionero de la electrodinámica cuántica y excéntrico genial, vislumbró una frontera de la ciencia que debía ser explorada para extender nuestro conocimiento y aplicarlo en beneficio de la humanidad. Feynman fue el primero en sugerir la posibilidad de construir máquinas cada vez más pequeñas, hasta llegar al nivel molecular.

El término nanotécnica (así como el término relacionado nanociencia) se ha empleado profusamente desde que K. Eric Drexler, del Instituto Foresight (Palo Alto), lo acuñó; sin embargo, su significado resulta en ocasiones confuso debido a las distintas definiciones que de él se han dado en el transcurso de los últimos años. En términos exactos, cuando hablamos de nanotécnica deberíamos referirnos a los procedimientos que, basados en la adecuada disposición y manejo de átomos, moléculas o ambos, resulten en la obtención de productos más ligeros y precisos, de mayor resistencia, más ecológicos y más económicos que los actuales.

Distinta es, sin embargo, la técnica en la que el tamaño nanoscópico se alcanza, no por el ensamblaje controlado de átomos y moléculas, sino por partición y división de objetos micrométricos. Pero lo que separa la micro de la macrotécnica no es sólo el tamaño de los objetos sino las propiedades físicas que éstos exhiben, que cambian en función de la relación superficie-volumen del propio objeto. Es este cambio de propiedades el que permite definir, sin ambigüedad, las fronteras de la nanotécnica. En general, alcanzan este límite los objetos de alrededor de un centenar de nanómetros. (Un nanómetro corresponde a la millonésima de milímetro. El diámetro típico de un cabello humano es del orden de 200.000 nanómetros.)

Aplicaciones biomédicas: aerosoles y cápsulas

Si el manejo controlado de átomos y moléculas para mejorar las propiedades de materiales y dispositivos está comenzando a dar sus primeros pasos, la obtención de estructuras nanométricas por división de objetos micrométricos constituye, por el contrario, una realidad tangible que ya ha fructificado en diversas



1. LAS INESTABILIDADES VARICOSAS terminan por romper en gotas este chorro capilar líquido de 400 micras de diámetro (superposición de imágenes obtenidas con luz estroboscópica).

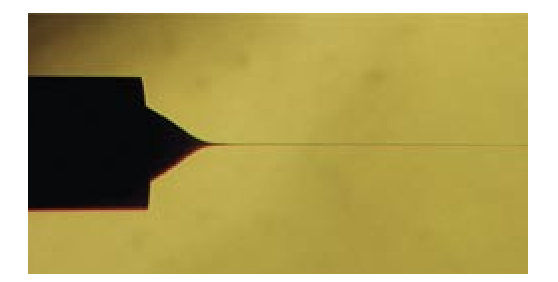
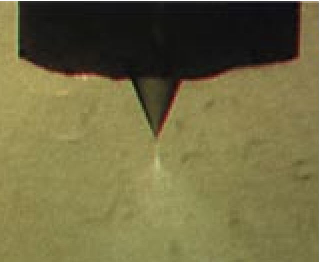
A. BARRERO, I. G. LOSCERTALES, M. MARQUEZ

aplicaciones técnicas. El encapsulado de fármacos o la fabricación de micro y nanoestructuras complejas constituyen ejemplos típicos. En la actualidad, varias compañías farmacéuticas están desarrollando dispositivos para administrar insulina por vía pulmonar mediante la inhalación de un aerosol de esta sustancia. Para que la insulina alcance los alvéolos bronquiales y se difunda desde allí por el torrente sanguíneo, el diámetro de las gotas inhaladas no debe exceder las 2 micras. Los ensayos clínicos para esta forma galénica de la insulina están en la fase 3; su comercialización, que se espera en breve, representará un profundo alivio para los más de diez millones de diabéticos que hoy día rehúsan el tratamiento estándar, debido a un comprensible rechazo hacia la inyección subcutánea.

La síntesis de un principio activo constituye sólo una parte del proceso de fabricación de un nuevo medicamento. Un tratamiento eficaz requiere también un transporte adecuado de la droga hasta los órganos y tejidos que la precisan y un control apropiado de su tiempo de administración. En el tracto gastrointestinal, por ejemplo, ésta debe superar ambientes extraordinariamente agresivos; de ahí la necesidad de un encapsulado que la proteja de desafíos severos. Si se requiere que las cápsulas atraviesen la pared intestinal, su tamaño no deberá exceder los 1000 nanómetros; sólo las de 400 nanómetros, o menores, lograrán escapar del sistema inmunológico. Las nuevas estrategias para el tratamiento del cáncer se basarán en identificar las células cancerosas y destruirlas sin dañar el tejido sano. Para ello será necesario transportar las cápsulas que encierren radionucleótidos, toxinas u otros agentes quimioterapéuticos, allí donde se encuentren las células cancerosas. El uso de materiales inteligentes resultará, por tanto, imprescindible para fabricar estas cápsulas —con tamaños de entre 50 y 100 nanómetros y una carga de fármaco apropiada para destruir una célula cancerosa—, puesto que cada una de ellas deberá identificar estas células, unirse a ellas o introducirse en su interior y liberar su contenido.

Otra alternativa para el tratamiento selectivo del cáncer consiste en quemar las células cancerosas mediante cápsulas de vidrio, de unos 100 nanómetros, recubiertas por una fina lámina de oro sobre la que se adhieren anticuerpos específicos. Inyectadas en el torrente sanguíneo, las cápsulas reconocen las células cancerosas y se unen a ellas mediante dichos anticuerpos. Se somete, entonces, al paciente a radiación infrarroja (inocua para él), que es absorbida por los átomos de oro, de forma que la temperatura superficial de las cápsulas aumenta hasta el nivel requerido para matar las células cancerosas.

Se colige, por tanto, que el desarrollo de técnicas para el encapsulado de medicamentos, proteínas, vitaminas, aditivos alimentarios, burbujas de gas, e incluso células vivas o material genético, es de vital importancia en aplicaciones que cubren desde el diseño funcional de alimentos hasta la administración de fármacos u otras sustancias de interés biomédico.

A. BARRERO, I. G. LOSCERTALES, M. MARQUEZ

2. LA VISCOSIDAD aumenta la estabilidad de un chorro y, por tanto, la longitud que alcanza sin romperse. En la imagen, el chorro de agua (*b*) se atomiza mucho antes que el de glicerina (*a*), más viscoso y, por tanto, más estable y más largo.

Nuevos materiales

En el ámbito de los nuevos materiales, las aplicaciones potenciales de las nanopartículas complejas —partículas compuestas de núcleo y cubierta protectora, esferas huecas, fibras, tubos, etcétera— han atraído la atención de un gran número de expertos. Un ejemplo corresponde a la fabricación de nanopartículas para las que se emplean materiales inorgánicos, cerámicos, metálicos, compuestos semiconductores y polímeros.

La primera aplicación conocida de lo que hoy denominamos nanotécnica, se remonta a la Roma antigua. A la sazón, los vidrieros, a pesar de desconocer los fenómenos asociados a la dispersión de la luz, cubrían vasos ornamentales con minúsculas partículas de oro; conseguían así que el color de la luz reflejada por el vaso cambiara al variar el ángulo de la luz incidente. El vaso de Licurgo constituye sin duda la pieza más representativa de esta bellísima cerámica romana.

El uso de nanopartículas de carbono en el procesamiento del caucho, para mejorar las propiedades mecánicas y térmicas de los neumáticos de automóviles, constituye otro ejemplo característico. Siguiendo con la industria de la automoción, se ha publicado en fecha reciente que el uso de polímeros nanocompuestos en la fabricación de automóviles en EE.UU. ahorraría al año más de 1500 millones de litros de gasolina, con una consiguiente reducción de las emisiones de CO_2 cercana a los 5 millones de toneladas.

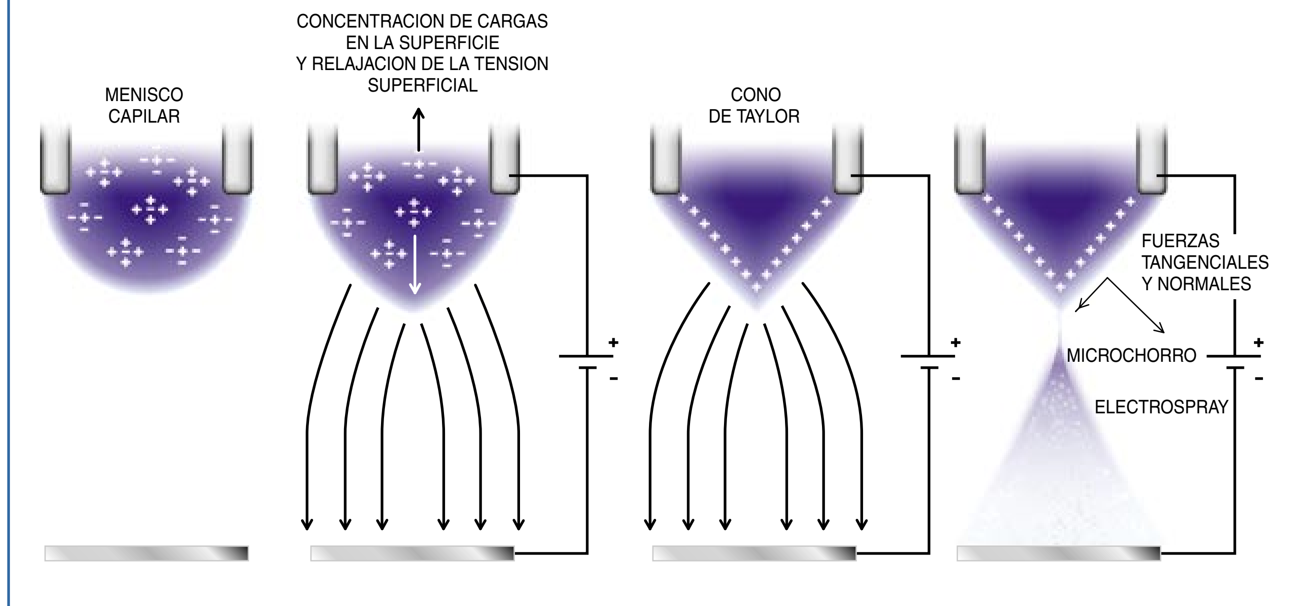
En general, el uso de otros materiales (cerámicos, metálicos, semiconductores, polímeros, etcétera), con dimensiones inferiores a los 50 nanómetros, resulta imprescindible para la fabricación de materiales nanocompuestos (que constan de fibras de unos pocos nanómetros). Estos representan una alternativa radical a los actuales materiales reforzados con partículas micrométricas, puesto que pueden hacerse igual de resistentes y rígidos, pero mucho más ligeros. Los materiales recubiertos de partículas cerámicas nanométricas están reemplazando paulatinamente los ordinarios (sin recubrimiento), por su mayor dureza y resistencia al desgaste. Como se indicó anteriormente, estos cambios en las propiedades mecánicas se deben a que cuando el tamaño del grano disminuye, aumenta la relación entre el número de átomos de la superficie del grano y el número de átomos que ocupan su volumen —o, en términos más físicos, cuanto menor es el

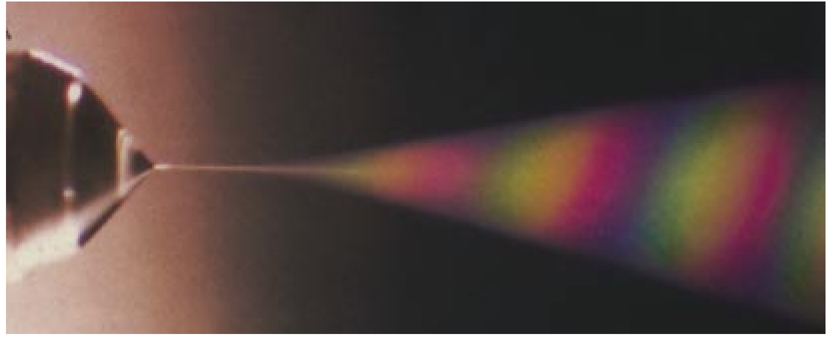
COMO SE OBTIENE UN ELECTROSPRAY

DE ENTRE TODOS LOS METODOS de atomización de líquidos, la electrohidrodinámica es el que produce de forma más controlable y fiable gotas del mismo tamaño y dotadas de carga eléctrica. Además, permite alcanzar tamaños de gota en el rango nanométrico.

El líquido se eyecta en forma de chorro capilar desde el vértice de un menisco electrificado, que adopta la forma de un cono de Taylor estacionario cuando se aplica un potencial de unos pocos kilovoltios entre la aguja y un conductor conectado a tierra. Este microchorro, muy delgado y extraordinariamente estable, emerge entonces del vértice del cono para romper finalmente, debido a las inestabilidades capilares, en una nube, o electrospray, de gotas dotadas de carga.

El proceso de emisión involucra varios fenómenos electrohidrodinámicos, que deben analizarse mediante complejos modelos teóricos si se desea controlar las características del fluido atomizado (tamaño y carga de las gotas, etcétera).





ELECTROSPRAY DE METANOL en el que se observa el efecto Tyndall. Las gotas con diámetros de entre 380 y 720 nanómetros reflejan la luz azul e impiden su paso a través del spray por ser éstas mayores que la longitud de onda de dicha radiación (380 nm). En cambio, las otras componentes de la luz blanca (de longitud de onda mayor) pasan sin dificultad a través de la nube de gotas.

grano, mayor protagonismo ejercen las interacciones entre los átomos superficiales.

La adición de esferas huecas a los sustratos empleados en electrónica ha resultado ser un método eficaz para reducir la constante dieléctrica efectiva de estos materiales, lo que redunda en una mayor eficiencia en algunos equipos electrónicos. Para terminar con las aplicaciones, permítasenos citar los nanotubos o nanocapilares de materiales inorgánicos e híbridos: estructuras complejas distintas de los populares nanotubos de carbono, de interés en biocatálisis, bioseparación y administración de fármacos entre otros campos.

Atomización electrohidrodinámica

Un gran número de los métodos empleados para obtener estructuras submicrométricas a partir de sistemas físicos milimétricos, o mayores, se basan en la dispersión controlada de un líquido en el seno de otro fluido, de forma que se produce un incremento notable de la relación superficie-volumen. Puesto que la tensión superficial se opone espontáneamente a este fenómeno, debe introducirse energía en el sistema para que la atomización resulte eficaz.

Atendiendo a la naturaleza física del proceso en que se basan, se distinguen dos grandes tipos de métodos. Uno de los más usados en la fabricación de cápsulas micrométricas, nanométricas, o ambas recurre a las emulsiones: dos fluidos inmiscibles, uno que contiene disuelta la sustancia a encapsular y otro que contiene el polímero que conformará la corteza de la cápsula, se agitan hasta formar una emulsión que se estabiliza mediante vertido en una tercera disolución. La extracción del disolvente

A. BARRERO, I. G. LOSCERTALES, M. MARQUEZ

portador del polímero da lugar a la solidificación de éste y a la formación de las cápsulas.

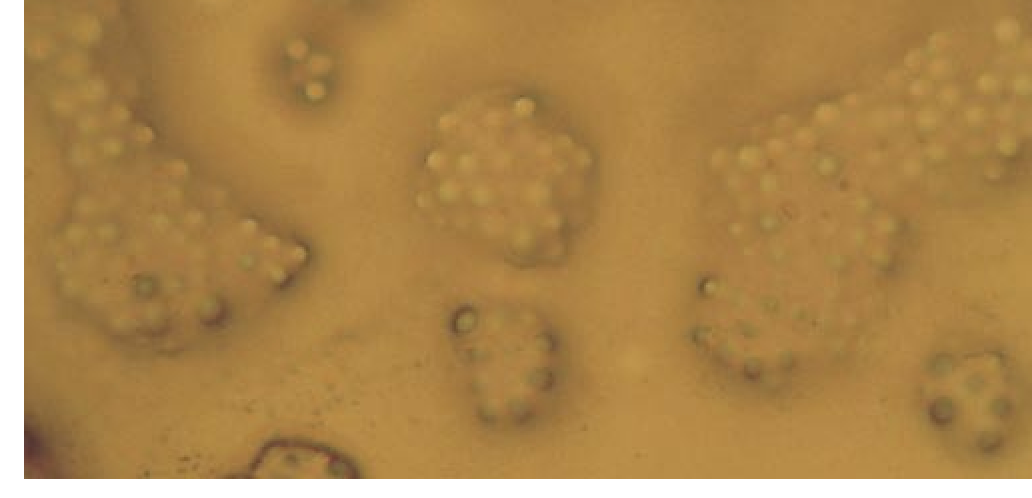
El otro método al que nos referiremos aquí recurre a la rotura de un chorro capilar (de diámetro inferior a los 2 o 3 milímetros) mediante inestabilidades varicosas asociadas a la tensión superficial. Un chorro capilar es inestable y rompe en gotas a una cierta distancia aguas abajo; dicha inestabilidad se debe a las fuerzas de tensión superficial. En efecto, el valor de la sobrepresión en el interior de un chorro capilar es directamente proporcional a la tensión superficial de la pareja de fluidos que interaccionan a través de la entrefase e inversamente proporcional al radio del chorro. Cualquier perturbación natural, o forzada, de la entrefase resultará en sobrepresión en las zonas más delgadas del chorro y depresión en las más gruesas. Dado que el líquido fluye desde las zonas de alta presión hacia las de baja, con el tiempo, las primeras adelgazan mientras que las otras engruesan, la amplitud de la perturbación crece y la inestabilidad conduce, por fin, a la rotura del chorro.

De lo anterior se deduce que la rotura de un chorro líquido de diámetro micro o nanométrico ofrece un punto de partida para la obtención de partículas, cápsulas y otras estructuras complejas micro o nanoscópicas. Técnicas basadas en la acción de fuerzas hidrodinámicas permiten obtener chorros con diámetros micrométricos, o moderadamente submicrométricos; combinadas con el uso de campos eléctricos intensos, permiten alcanzar diámetros considerablemente menores.

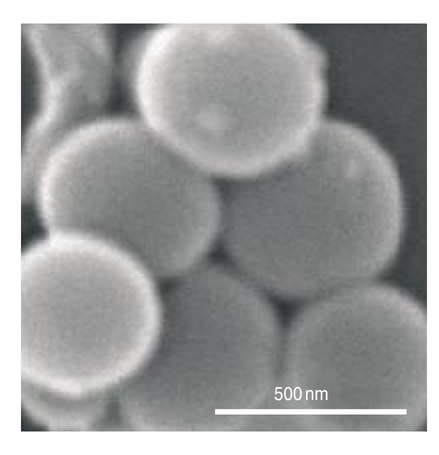
La acción de un campo eléctrico sobre la entrefase de un líquido conductor se conoce al menos desde 1600, cuando William Gilbert, en su obra *De Magneto*, relató la existencia de meniscos cónicos, que se formaban cuando un trozo de ámbar se aproximaba a una pequeña gota de agua. Hubo que esperar casi cuatro siglos para que Geoffrey I. Taylor, a partir de un balance entre las fuerzas eléctricas perpendiculares a la superficie del cono y la presión capilar, diera explicación a la forma cónica de los meniscos electrificados, que en su honor se denominan hoy conos de Taylor o de Gilbert-Taylor para honrar también a su primer descubridor.

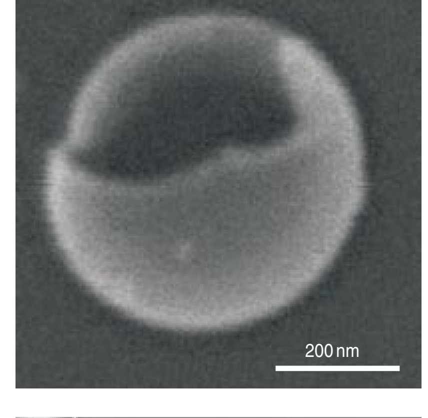
Los altos valores que el campo eléctrico alcanza en las proximidades del vértice cónico son responsables de la emisión de carga y masa a través del chorro. El diámetro del chorro disminuye al aumentar la conductividad eléctrica del líquido.

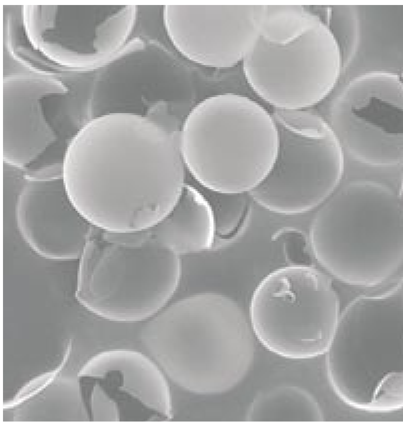
La técnica de atomización electrohidrodinámica, o *electrospray*, se basa en inyectar lentamente un líquido conductor a través de una aguja electrificada. Para un intervalo apropiado de valores del caudal inyectado y de la diferencia de potencial eléctrico aplicada entre la aguja y un conductor conectado a tierra, el menisco electrificado adopta la forma de un cono de Taylor estacionario; desde su vértice se emite un chorro que rompe aguas abajo por inestabi-

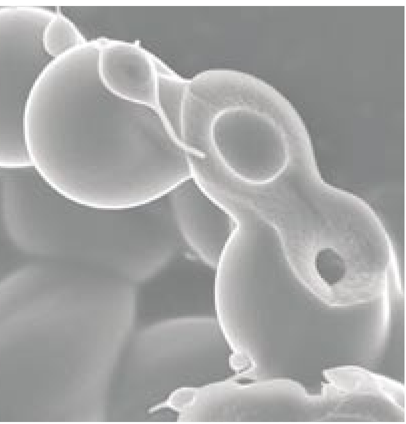


3. MICROCAPSULAS de unas 10 micras de diámetro generadas a partir de un chorro coaxial compuesto de una disolución acuosa en el interior y un fotopolímero (Somos 6120, de DuPont) en el exterior.







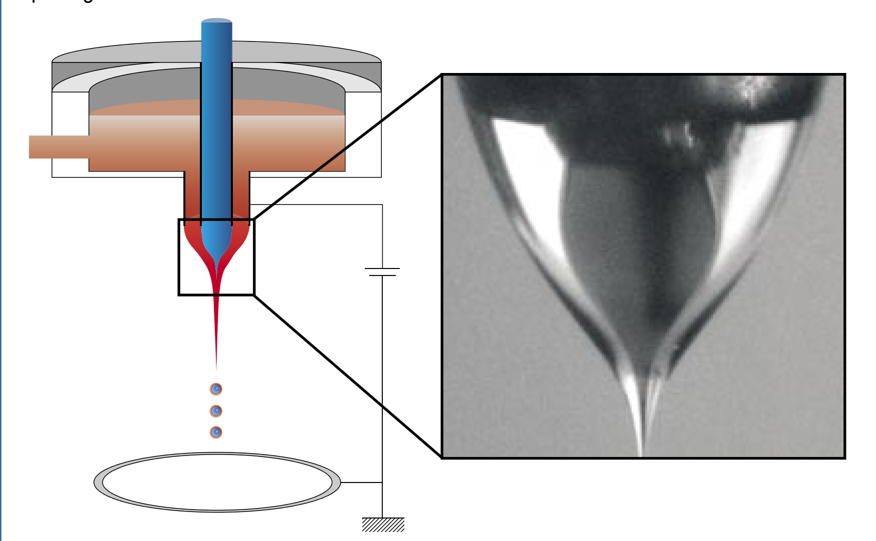


4. NANOESFERAS HUECAS para uso en microelectrónica de alta velocidad obtenidas a partir de chorros coaxiales electrificados y técnicas sol-gel. Imágenes de espectroscopía electrónica de barrido.

A. BARRERO, I. G. LOSCERTALES, M. MARQUEZ

CHORROS COAXIALES: UN CHORRO DENTRO DE OTRO

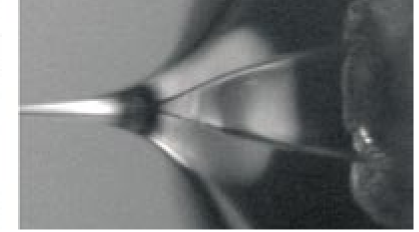
LA ATOMIZACION DE FLUIDOS puede aplicarse a la producción de cápsulas y otras estructuras de interés. Ello se consigue mediante una técnica de nuevo cuño que se sirve de la acción de las fuerzas electrohidrodinámicas sobre entrefases fluidas para generar chorros coaxiales con diámetros nanométricos.



Dos líquidos inmiscibles (*rojo* y *azul*) se inyectan a través de dos agujas electrificadas concéntricas. Para valores apropiados del caudal y el voltaje aplicado, se forman dos meniscos —uno en el interior del otro (*detalle*)— desde cuyos vértices se emiten sendos chorros estacionarios que fluyen coaxialmente.

CONO DE TAYLOR. Para obtener un menisco cónico estructurado, el esfuerzo eléctrico tangencial debe actuar al menos sobre una de las entrefases. En estas fotografías se observa un cono de Taylor electrificado de agua en el interior de un menisco de líquido no conductor (aceite de oliva). Los esfuerzos eléctricos tangentes a la entrefase agua-aceite se transmiten por viscosidad al resto del aceite y lo ponen en movimiento dirigiéndolo hacia el vértice del cono de agua. Los dos flujos cofluyentes resultan en un chorro coaxial de agua recubierto por aceite. Cabe mencionar que el control de los caudales de los líquidos permite no sólo un buen control del diámetro del chorro sino también del espesor de la película de aceite. Obsérvese cómo cambia la forma del cono interior al pasar de una capa fina de aceite (*a*) a otra gruesa (*b*).





A. BARRERO, I. G. LOSCERTALES, M. MARQUEZ

lidades capilares, formando un spray de gotas dotadas de carga. Reviste mayor interés el hecho de que los diámetros del chorro y de las gotas resultantes son completamente independientes del de la aguja. El diámetro del chorro depende básicamente de la conductividad eléctrica del líquido, tanto menor éste cuanto mayor es aquélla. También el campo eléctrico en el cono-chorro está fuertemente influido por la conductividad eléctrica del líquido; sus valores típicos se hallan en un intervalo de 10^7-10^9 V/m.

Conviene precisar que si bien las ecuaciones diferenciales y condiciones de contorno que gobiernan la electrohidrodinámica del cono-chorro son bien conocidas (ecuaciones de Navier-Stokes y de Maxwell), su resolución numérica entraña una extraordinaria complejidad. Ello se debe sobre todo a la disparidad de escalas de longitud —el diámetro del chorro es unas mil veces menor que el del cono—, al desconocimiento de la entrefase (que debe ser determinada como parte de la solución del problema) y a la dependencia temporal de las variables electro-fluido-mecánicas en la región de rotura del chorro. Sólo en fecha muy reciente se ha abordado la resolución numérica de la región de transición del cono al chorro recurriendo a hipótesis simplificadoras. La experimentación, por tanto, ha constituido el recurso básico para estudiar este fenómeno y determinar la dependencia funcional, o leyes de escala, que permiten predecir la carga y el tamaño de las gotas en función del caudal de líquido electroatomizado y de sus propiedades físicas, principalmente la conductividad eléctrica.

Debido a las propiedades del electrospray, entre las que cabe destacar la sencillez de su manejo, el amplio intervalo del tamaño de las gotas (que, en función de la conductividad del líquido empleado, varía desde centenares de micras para los líquidos menos conductores hasta pocas decenas de nanómetros para los muy conductores) y la uniformidad del tamaño de las gotas, sus aplicaciones han venido a ser, en los últimos años, moneda corriente en la ingeniería química, la ciencia y la técnica de materiales, la agricultura y la medicina entre otros

campos. A ello ha contribuido, sin duda, el hecho de que la atomización electrohidrodinámica ha pasado de ser un conjunto de observaciones empíricas pobremente entendidas a establecerse como una rama de la ciencia sólidamente fundamentada. Se citan a continuación algunos ejemplos de notables aplicaciones del electrospray.

John Fenn, de la Universidad Commonwealth de Virginia, revolucionó la química analítica y compartió el premio Nobel de química en 2002 por su contribución al análisis de biomoléculas. Fenn logró mantener en suspensión macroiones de sustancias biológicas en fase gaseosa, utilizando una fuente de electrospray. En este caso, la evaporación del solvente de las gotas del *spray* resulta en macroiones de analito con una relación carga eléctrica-masa suficientemente alta para ser detectados mediante un espectrómetro de masas estándar. Otras aplicaciones del electrospray, algunas en fase de desarrollo y otras ya consolidadas, son: la síntesis de nanopartículas, la deposición electrostática de películas nanométricas de materiales cerámicos o polímeros, la dispersión de plaguicidas, la inhalación terapéutica de drogas y proteínas, la combustión (sobre todo en micromotores) y la propulsión coloidal para satélites de masa pequeña.

En fecha reciente se han obtenido electrosprays en el seno de líquidos dieléctricos; ello amplía de forma notable sus aplicaciones en el campo de las emulsiones o del encapsulado de sustancias realizado en medios líquidos. La adición a una de las fases de sustancias tensoactivas anfipáticas —denominadas así por poseer una parte hidrófoba y otra hidrófila— inhibe la coalescencia de las gotas y abre nuevos campos de aplicación de estas técnicas; por ejemplo, al campo de los cristales líquidos. La atomización electrohidrodinámica, por tanto, puede desempeñar una función clave en la producción de nanoemulsiones y en el campo de los fluidos complejos.

Chorros coaxiales electrificados

La posibilidad de aplicar la electroatomización a la producción de cápsulas y otras estructuras de interés nanotécnico se ha visto reforzada a partir de un trabajo reciente, que utiliza la acción de las fuerzas electro-hidrodinámicas sobre entrefases fluidas para generar chorros coaxiales con diámetros nanométricos. La técnica consiste en inyectar dos líquidos inmiscibles a través de dos agujas electrificadas, concéntricas; lo mismo que en el caso del electrospray simple, para valores apropiados del caudal y el voltaje aplicado se forman dos meniscos —uno en el interior del otro— desde cuyos vértices se emiten sendos chorros estacionarios que fluyen coaxialmente.

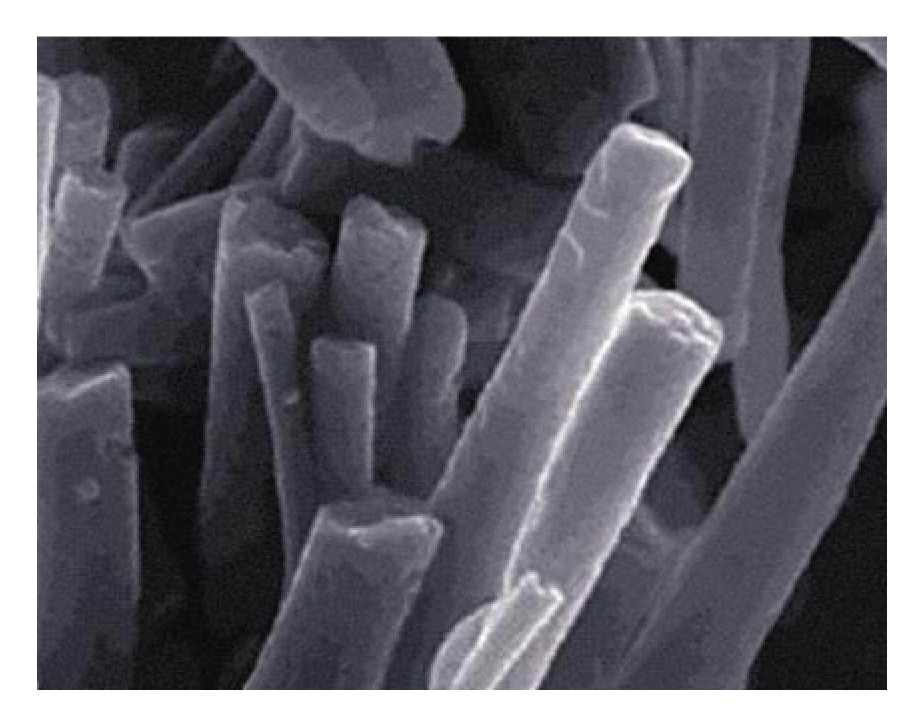
Para desarrollar esta estructura, se inyecta el líquido exterior y se incrementa el potencial eléctrico de la aguja exterior hasta que el menisco adopta la forma cónica característica. La acción de los esfuerzos eléctricos tangenciales, que actúan sobre la entrefase exterior y "tiran" del líquido hacia el vértice, se difunde hacia el interior merced a la viscosidad del líquido, que debe ser suficientemente alta para que la difusión resulte eficiente. El segundo líquido, que fluye a través de la aguja interior, forma un nuevo menisco que es deformado y succionado por el movimiento del líquido exterior, con el que forma un chorro coaxial de tipo bicapa.

Para obtener un menisco cónico estructurado, el esfuerzo eléctrico tangencial debe actuar al menos sobre una de las entrefases. En un cono electrificado de agua en el interior de un menisco de líquido no conductor como el aceite de oliva, por ejemplo, los esfuerzos eléctricos tangentes a la entrefase agua-aceite se transmiten por viscosidad al resto del aceite y lo arrastran hacia el vértice del cono de agua. Los dos flujos cofluyentes resultan en un chorro coaxial de agua recubierta de aceite. Cabe mencionar que la regulación del caudal de los líquidos permite controlar no sólo el diámetro del chorro sino también el espesor de la película de aceite.

Cápsulas y esferas huecas

Esta técnica se ha utilizado con éxito en la obtención de micro y nanocápsulas con vistas a su aplicación al encapsulado de fármacos y aditivos alimentarios. El *spray* que se forma a partir de la rotura varicosa de un chorro coaxial electrificado compuesto de una solución acuosa (líquido interior) y un fotopolímero (líquido exterior), por ejemplo, se somete a luz ultravioleta; con ello se consigue solidificar el fotopolímero que contiene el líquido exterior y obtener así cápsulas micro y nanométricas.

Combinados con técnicas de autoensamblado (*self-assembly*) como la sol-gel, los chorros coaxiales han

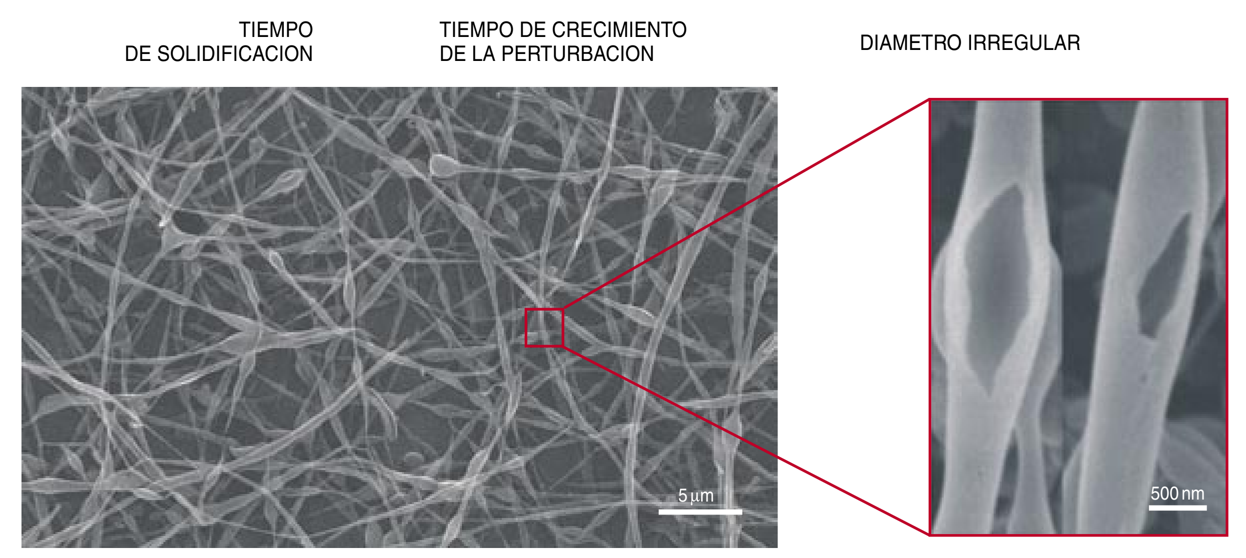


5. NANOFIBRAS de óxido de alúmina (a-Al_2O_3) obtenidas mediante electrospray simple y técnicas sol-gel. Diámetros por debajo de 150 nanómetros y longitudes varias veces mayores.

A. BARRERO, I. G. LOSCERTALES, M. MARQUEZ

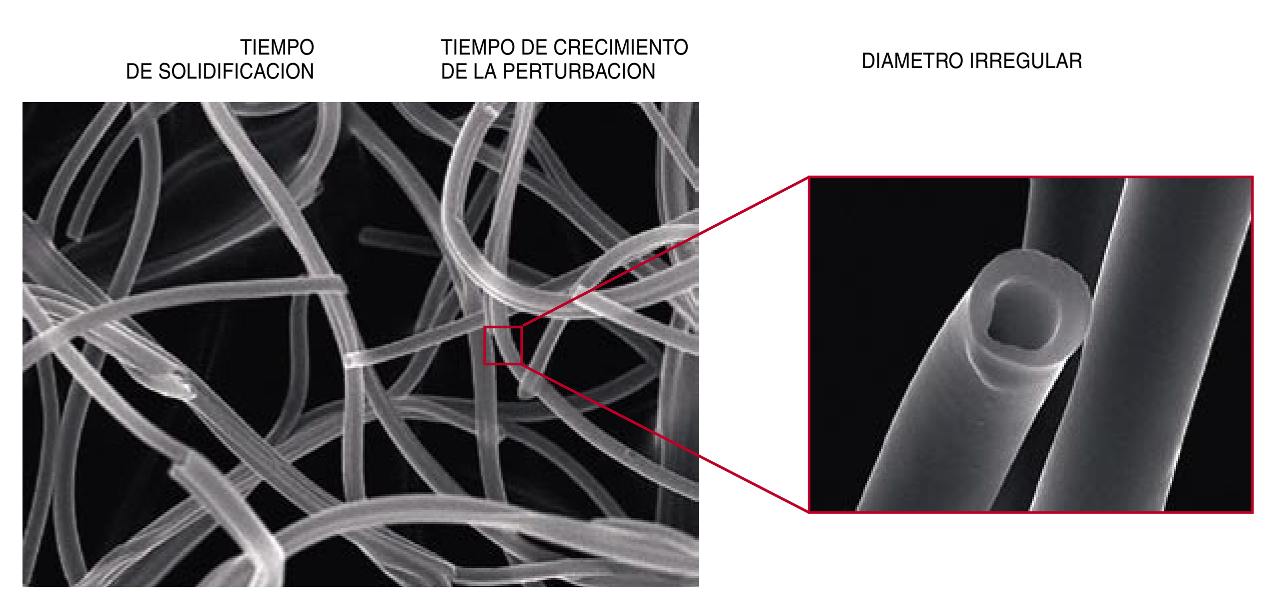
COMO OBTENER NANOTUBOS DE DIAMETRO REGULAR

LOS CHORROS COAXIALES ELECTRIFICADOS sirven también para obtener nanotubos. La formulación del líquido exterior debe ajustarse para que solidifique antes de que el chorro rompa por inestabilidades varicosas. Si el tiempo de solidificación y el de crecimiento de las perturbaciones capilares son comparables, pueden aparecer distorsiones del cilindro; para evitarlas, la relación entre ambos tiempos debe reducirse, disminuyendo el tiempo de solidificación de la solución exterior o bien aumentando el tiempo necesario para que crezcan las inestabilidades capilares. El ritmo de crecimiento de estas perturbaciones depende de las propiedades de los líquidos, sobre todo de la viscosidad y la tensión superficial. Así, en general, la estabilidad de un chorro, y por tanto la longitud que alcanza sin romperse, aumenta cuando la tensión superficial disminuye y la viscosidad crece.



LIQUIDO INTERIOR: ACEITE
LIQUIDO EXTERIOR: SOLUCION SOL-GEL

Debido a la similitud entre el tiempo de solidificación y el de crecimiento de las perturbaciones capilares, el diámetro (de unos 500 nanómetros) de estos nanotubos presenta irregularidades. La pared es de alrededor de 60 nanómetros. El detalle de su estructura (*derecha*) muestra su rotura por medios mecánicos.



LIQUIDO INTERIOR: ACEITE
LIQUIDO EXTERIOR: SOLUCION SOL-GEL

Al sustituir el aceite del interior por glicerina (sustancia de mayor viscosidad) la estabilidad del chorro aumenta de forma notable. Ello hace que el tiempo de crecimiento de las perturbaciones capilares sea superior al de solidificación y, por tanto, el diámetro de los nanotubos presente mayor regularidad. La longitud supera el milímetro e incluso puede llegar al centímetro.

A. BARRERO, I. G. LOSCERTALES, M. MARQUEZ

probado recientemente su eficacia en la obtención de estructuras nanoscópicas de mayor complejidad. Este proceso sol-gel parte de una dispersión coloidal (sol) de nanopartículas sólidas en un líquido que se acoplan en una estructura sólida tridimensional (gel). El sólido resultante es altamente poroso, ligero y muy uniforme, debido a que las partículas y los poros que lo forman se hallan en el rango nanométrico. La formación del micro/nano chorro mediante fuerzas eléctricas permite flexibilizar y dirigir el proceso de autoensamblado de las nanopartículas.

Como ejemplo de lo anterior, se han obtenido esferas huecas a partir de la formación de micro/nano chorros coaxiales electrificados con una disolución de tetraetilo (TEOS) y oligosiloxano cíclico (D3) parcialmente envejecida (líquido exterior) y aceite de oliva o agua (líquido interior). La corteza de las cápsulas líquidas solidifica durante el vuelo de las mismas desde su formación hasta su recogida. De esta forma, se obtienen cápsulas sólidas de óxido de silicio que encierran aceite (o agua). Al ser el óxido de silicio un material poroso, el líquido interior se extrae fácilmente mediante un lavado con diclorometano u otro disolvente apropiado. Cabe remarcar que el diámetro de las esferas, así como su espesor pueden controlarse fácilmente mediante el caudal de inyección de los líquidos interior y exterior.

Nanofibras y nanotubos

Si el tiempo de solidificación de la solución se hace menor que el tiempo requerido para que el chorro rompa en gotas, la técnica de los chorros coaxiales electrificados sirve también para obtener estructuras cilíndricas: nanofibras y nanofibras huecas, o nanotubos. En efecto, se han obtenido nanotubos a partir de formulaciones sol-gel como líquido exterior (aunque puede usarse una amplia variedad de sustancias químicas) y aceite de oliva o glicerina como líquido interior. El envejecimiento previo de la formulación sol-gel se ajusta para que solidifique antes de que el chorro rompa por inestabilidades capilares.

Cuando el tiempo de solidificación y el de crecimiento de las perturbaciones capilares son comparables, pueden aparecer distorsiones del cilindro; para evitarlas, la relación entre ambos tiempos debe reducirse sustancialmente, disminuyendo el tiempo de solidificación de la solución exterior o bien aumentando el tiempo necesario para que crezcan las inestabilidades capilares. El ritmo de crecimiento de estas perturbaciones depende de las propiedades de los líquidos, sobre todo de la viscosidad y la tensión superficial. Así, en general, la estabilidad de un chorro y, por tanto, la longitud que alcanza sin romperse, aumentan cuando la tensión superficial disminuye y la viscosidad crece. Sustituir el aceite por glicerina (sustancia de mayor viscosidad), por ejemplo, incrementa de forma notable la estabilidad y longitud del chorro.

Cabe remarcar la ventaja de este método sobre otros existentes, que utilizan sólidos orgánicos, sintéticos o metálicos, como moldes para generar los nanotubos. Precisan éstos generar primero el molde sólido —que puede no ser tarea fácil—, formar luego el nanotubo por deposición o recrecimiento sobre la superficie del molde y por fin retirar éste o eliminarlo. La ventaja del método aquí descrito reside en que el molde es líquido y que la formación de fibras huecas se realiza en un solo paso —el líquido sale espontáneamente de los nanotubos cuando se encuentran a presión atmosférica o, en el peor de los casos, se extrae mediante un disolvente orgánico. Conviene añadir también que este proceso, por basarse en un método muy general, permite el uso de otros materiales para formar los nanotubos. Además, si como líquido interior se utilizase una formulación química susceptible de polimerizar, se obtendrían nanofibras compuestas.

Se ha expuesto aquí la existencia de técnicas, provenientes de la atomización electrohidrodinámica, que han probado su eficacia para la obtención de estructuras nanoscópicas. En particular, la técnica de chorros coaxiales electrificados, nacida en los laboratorios de Mecánica de Fluidos de las universidades de Sevilla y Málaga, ha demostrado su competencia en la producción de micro y nanocápsulas, nanofibras compuestas, nanotubos, emulsiones y otros fluidos complejos, y otras estructuras de interés nanotécnico.

Los autores

Antonio Barrero es ingeniero aeronáutico, catedrático del departamento de ingeniería energética y mecánica de fluidos de la Universidad de Sevilla y académico de número de la Real Academia de Ingeniería. **Ignacio González Loscertales** es ingeniero industrial por la Universidad de Sevilla, doctor por la Universidad de Yale y profesor de mecánica de fluidos en la Universidad de Málaga. **Manuel Márquez** es miembro de la división de química en el Laboratorio Nacional de Los Alamos, en Nuevo México, profesor en el departamento de bioingeniería en la Universidad del Estado de Arizona e investigador asociado en los grupos de química teórica en NIST y física aplicada en Harvard. Los autores dedican este artículo a la memoria del profesor Roberto Fernández de Caleya que contribuyó de forma decisiva al despegue de la investigación española.

Bibliografía complementaria

NANOSYSTEMS: MOLECULAR MACHINERY, MANUFACTURING, AND COMPUTATION. K. E. Drexler. Wiley & Sons, 1992.

NANOCOMPOSITES: NEW LOW-COST, HIGH-STRENGTH MATERIALS FOR AUTOMOTIVE PARTS. ATP-Project 97-02-0047. National Institute of Technology, 1997.

ESTUDIO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE LA ROTURA DE CHORROS CARGADOS EN AUSENCIA DE CAMPO ELÉCTRICO AXIAL IMPUESTO. J. M. López Herrera. Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla; 1999.

USING SELECTIVE WITHDRAWAL TO COAT MICROPARTICLES. Itai Cohen, Hui Li, James L. Hougland, Milan Mrksich, Sidney R. Nagel, en *Science*, vol. 292, págs. 265-67; 13 de abril, 2001.

MICRO/NANO ENCAPSULATION VIA ELECTRIFIED COAXIAL LIQUID JETS. I. G. Loscertales, A. Barrero, I. Guerrero, R. Cortijo, M. Márquez y A. M. Gañán Calvo, en *Science*, vol. 295, págs. 1695-1698; 1 de marzo, 2002.

El movimiento browniano según Einstein

En el año 1905 todavía se discutía si la materia se componía de átomos y moléculas. Albert Einstein no sólo contribuyó a consolidar el concepto de estructura molecular, sino que también dio un nuevo impulso a la física estadística

Georg Wolschin

A diferencia de los renombrados artículos de Einstein sobre la teoría de la relatividad especial, otros dos originales suyos, publicados también en 1905, no resultan muy conocidos por el público. No obstante, forman parte de las publicaciones punteras con las que el "experto de tercera clase" de la oficina de patentes de Berna fecundó el desarrollo posterior de la física.

Ambos artículos se ocupan del movimiento browniano. Los científicos designan con esas palabras un movimiento trémulo, aparentemente irregular, de las partículas macroscópicas en suspensión en líquidos. Su desplazamiento en zigzag está provocado —como Einstein supuso— por el movimiento térmico de las moléculas del líquido que chocan con las partículas.

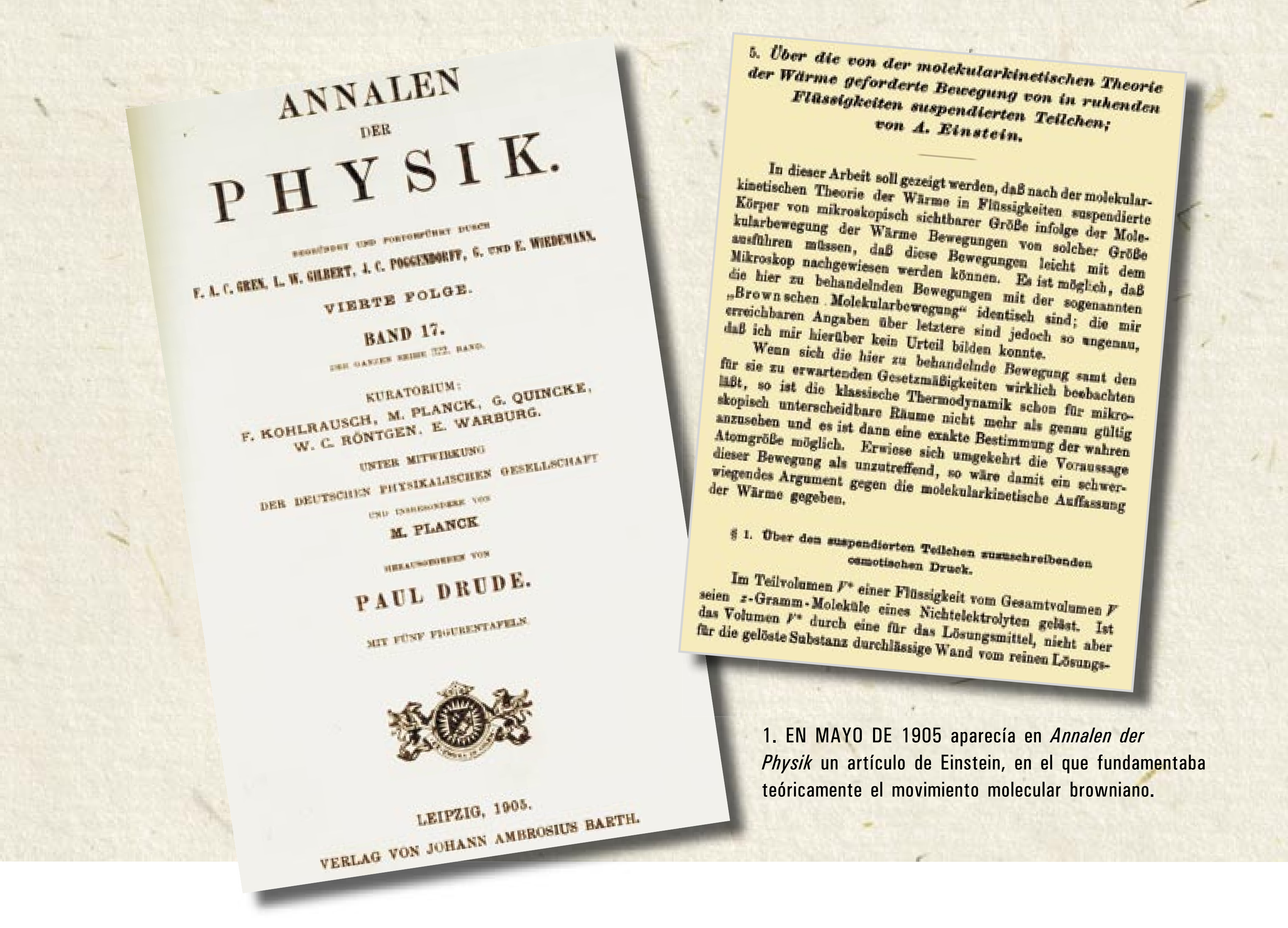
Con esos artículos Einstein allanó el camino a la prueba experimental de la existencia de las invisibles moléculas del líquido. El fisicoquímico francés Jean Baptiste Perrin (1870-1942) confirmó en 1908 que la materia está compuesta de átomos; por ese trabajo (entre otros) recibió en 1926 el premio Nobel de física. Einstein había tenido ese honor cinco años antes, pero no por los trabajos sobre el movimiento browniano ni por la teoría de la relatividad, sino por la explicación del efecto fotoeléctrico.

Hacía tiempo que se conocía el fenómeno del movimiento browniano, pero faltaba aún la interpretación teórica adecuada. Se le llama así en honor del botánico escocés Robert Brown (1773-1858), a quien también se debe la primera descripción clara del núcleo de la célula; su contribución fue decisiva para que la botánica se convirtiese en una disciplina científica. Estudiando al microscopio granos de polen en una gota de agua, advirtió que se hallaban en un constante movimiento trémulo, que ni paraba ni se frenaba. Descartó que influjos externos, por ejemplo la luz, fueran la causa.

En un principio, Brown intentó explicar su hallazgo como una propiedad de los seres vivos. Pero descubrió que también las partículas minerales presentaban el mismo movimiento trémulo. Por consiguiente, debía tratarse de un efecto físico y no biológico.

Pasaron decenios sin que se conociera, ni de lejos, el significado básico del fenómeno. Uno de los mayores enigmas era que aquel temblor no se podía parar. ¿Qué proporcionaba esa constante energía a las partículas en suspensión?

Por fin, el 18 de julio de 1905 apareció en *Annalen der Physik* el artículo de Einstein que llevaba por título "Sobre el movimiento, postulado por la teoría cineticomolecular del calor, de las partículas en suspensión en líquidos en reposo". Ya en el primer párrafo escribía: "Es posible que los movimientos de los que nos ocupamos aquí sean idénticos al llamado 'movimiento browniano molecular'; pero los datos sobre este último a que he tenido acceso son tan imprecisos, que no podría emitir un juicio al respecto". Esta es la razón de que no haya ninguna referencia al movimiento browniano en el título del trabajo.



ANNALEN

DER

PHYSIK.

BEGRÜNDET UND FORTGEFÜHRT DURCH

F. A. C. GREN, L. W. GILBERT, J. C. POGGENDORFF, G. UND E. WIEDEMANN.

VIERTE FOLGE.

BAND 17.

KURATORIUM:

F. KOHLRAUSCH, M. PLANCK, G. QUINCKE, W. C. RÖNTGEN, E. WARBURG.

UNTER MITWIRKUNG

DER DEUTSCHEN PHYSIKALISCHEN GESELLSCHAFT

M. PLANCK

PAUL DRUDE.

MIT FÜNF FIGURENTAFELN.

LEIPZIG, 1905.

VERLAG VON JOHANN AMBROSIUS BARTH.

5. *Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen; von A. Einstein.*

In dieser Arbeit soll gezeigt werden, daß nach der molekularkinetischen Theorie der Wärme in Flüssigkeiten suspendierte Körper von mikroskopisch sichtbarer Größe infolge der Molekularbewegung der Wärme Bewegungen von solcher Größe ausführen müssen, daß diese Bewegungen leicht mit dem Mikroskop nachgewiesen werden können. Es ist möglich, daß die hier zu behandelnden Bewegungen mit der sogenannten „Brownschen Molekularbewegung" identisch sind; die mir erreichbaren Angaben über letztere sind jedoch so ungenau, daß ich mir hierüber kein Urteil bilden konnte.

Wenn sich die hier zu behandelnde Bewegung samt den für sie zu erwartenden Gesetzmäßigkeiten wirklich beobachten läßt, so ist die klassische Thermodynamik schon für mikroskopisch unterscheidbare Räume nicht mehr als genau gültig anzusehen und es ist dann eine exakte Bestimmung der wahren Atomgröße möglich. Erwiese sich umgekehrt die Voraussage dieser Bewegung als unzutreffend, so wäre damit ein schwerwiegendes Argument gegen die molekularkinetische Auffassung der Wärme gegeben.

§ 1. Über den suspendierten Teilchen zuzuschreibenden osmotischen Druck.

Im Teilvolumen V^* einer Flüssigkeit vom Gesamtvolumen V seien z-Gramm-Moleküle eines Nichtelektrolyten gelöst. Ist das Volumen V^* durch eine für das Lösungsmittel, nicht aber für die gelöste Substanz durchlässige Wand vom reinen Lösungs-

1. EN MAYO DE 1905 aparecía en *Annalen der Physik* un artículo de Einstein, en el que fundamentaba teóricamente el movimiento molecular browniano.

Pero hace mucho que quedó claro que la teoría de la difusión que propuso Einstein en esa publicación era aplicable al movimiento molecular browniano. Logró en ella dar una deducción teórica del coeficiente de difusión y derivar la conexión (denominada hoy relación de Einstein) entre el coeficiente de difusión y la temperatura.

La importancia para la ciencia moderna de los trabajos einsteinianos sobre el movimiento molecular browniano es enorme. La teoría de Einstein de la difusión no sólo resulta fundamental para la física en general y en determinados campos concretos, como la nanotecnología, sino también en biología y en química. Hoy se citan mucho más estos trabajos originales de Einstein que los que dedicó al efecto fotoeléctrico o a la relatividad especial.

La entrevista que ofrecemos a continuación con el físico Siegfried Grossmann, de la Universidad de Marburgo, ilustra la historia del origen, contenido y efecto de los trabajos einsteinianos en torno al movimiento molecular browniano.

Pregunta: ¿Cómo llegó Einstein a ocuparse del movimiento browniano?

Siegfried Grossmann: Hacia 1900 se discutía con apasionamiento sobre la estructura molecular de la materia. Eran los tiempos del tránsito intelectual, y quizá también emocional, de la física clásica a la física moderna de carácter atómico. Por eso no es sorprendente que también el joven Einstein, que en 1905 tenía 26 años, se ocupara de la física "cineticomolecular".

Ejercieron un gran influjo en Einstein los trabajos de Ludwig Boltzmann, Max Planck y Robert Kirchhoff sobre la teoría cinética de los gases y la termodinámica. Escribió su tesis doctoral sobre el análisis cineticomolecular de las disoluciones. En ella conectó los conceptos de la hidrodinámica clásica y los de la teoría de la difusión. Presentó la tesis en la Universidad de Zúrich en julio de 1905; una versión revisada apareció en febrero de 1906 en *Annalen der Physik*.

Pregunta: Así pues, ¿la teoría de la difusión de 1905 deriva de la tesis doctoral de Einstein?

Grossmann: Sí. El trabajo de 1905 sobre los cuerpos en suspensión, del que estamos hablando aquí, tiene su origen, en todo lo esencial, en la tesis doctoral de Einstein, donde se ocupó de las disoluciones. Otro trabajo subsiguiente, que apareció también en febrero de 1906 en *Annalen der Physik*, bajo el título "Zur Theorie der Brownschen Bewegung" (Acerca de la teoría del movimiento browniano), complementaría la teoría. A partir de ese momento, Einstein tenía la seguridad de que su teoría de la difusión describía el movimiento browniano, conocido desde hacía tiempo.

Pregunta: ¿Qué era, pues, lo radicalmente nuevo de su teoría de la difusión?

Grossmann: Einstein no basó su análisis en el teorema de la distribución uniforme de la energía entre todos los grados de libertad, como sus predecesores, sino en

la presión osmótica, macroscópicamente medible, de los “corpúsculos” en suspensión. Tampoco estudió su velocidad, que varía sin cesar por efecto de los choques con las moléculas del líquido que los circunda, sino el desplazamiento medio de los corpúsculos causado por los choques moleculares, que suceden con regularidad estadística. Manejaba, pues, una magnitud nueva, del todo distinta, adecuadamente elegida, que debía ser medible, y que de hecho se podía medir con el ultramicroscopio, que acababa de desarrollarse.

Pero también era nuevo que relacionara los parámetros del movimiento de difusión con la resistencia interna del líquido, el medio que se opone al movimiento de las partículas tras los choques y lo frena.

Pregunta: En lo que se refiere al desarrollo de la teoría de la difusión ¿es la posición de Einstein tan singular como en lo tocante a la teoría de la relatividad?

Grossmann: No del todo. El físico teórico Marian von Smoluchowski, que enseñó en las Universidades de Lemberg y Cracovia, había desarrollado por su parte la descripción del movimiento molecular browniano valiéndose del desplazamiento cuadrático medio bajo el efecto de los choques moleculares; la publicaría en 1907. También Ludwig Boltzmann había dicho en su teoría de los gases que el movimiento térmico de las moléculas debía conducir a un desplazamiento medible de los corpúsculos.

Pregunta: Hablando de “medible”, ¿cómo se podía confirmar la teoría de Einstein? ¿Eran suficientes las observaciones anteriores del temblor de las partículas en suspensión o hizo predicciones que se podían contrastar experimentalmente?

Grossmann: Einstein logró describir de forma cuantitativa y experimentalmente comprobable la física de los cuerpos en suspensión (en cierto sentido supermoléculas). Otorgaba un valor extraordinario a una confirmación experimental de sus fórmulas. Fue parte de su motivación para escribir ese trabajo.

Así, al comienzo del artículo dice que, según la teoría clásica de la termodinámica, no habría que esperar que las partículas en suspensión ejercieran ninguna fuerza sobre las paredes del recipiente. Pero —y éstas son las palabras originales de Einstein—, “desde el punto de vista de la teoría cineticomolecular del calor se llega a un modo de ver muy distinto... Los cuerpos en suspensión ejercen una presión osmótica”, como también las moléculas disueltas. Pues —y ésta fue su trascendente intuición— las moléculas de una solución y los cuerpos en suspensión se diferencian “sólo por su tamaño”. Evaluó esa presión y la extensión mediante difusión por diferencias de presión, y concluía con estas palabras: “Ojalá un investigador logre pronto resolver el problema planteado aquí, de importancia para la teoría del calor”.

Pregunta: ¿Y el investigador que lo consiguió fue Perrin?

Grossmann: Sí. El francés Jean Baptiste Perrin confirmó brillantemente, ya en 1908, con sus experimentos las conclusiones y predicciones einsteinianas sobre la difusión.

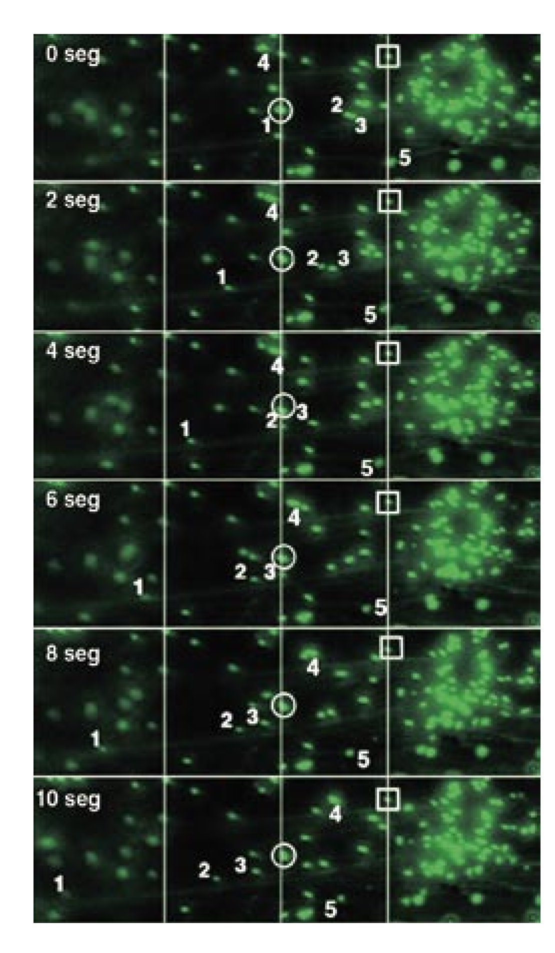
Pregunta: Pero, ¿cómo recibieron los contemporáneos de Einstein la teoría de la difusión? Antes de la confirmación experimental, ¿hubo también críticas?

Grossmann: Ya entonces se dio algún que otro problema de comprensión. Así, Wilhelm Conrad Röntgen conjeturaba, en una carta que le escribió a Einstein en septiembre de 1906, que el movimiento browniano estaba en contradicción con el segundo principio de la termodinámica, según el cual los procesos irreversibles en un sistema aislado van acompañados de un aumento de entropía. Algo análogo había manifestado Henri Poincaré.

Pero a Einstein no le afectaron lo más mínimo estas dudas, porque el movimiento de los constituyentes, es decir, de las moléculas del líquido, y el de las partículas en suspensión no se diferencian. El segundo principio tiene validez en la estadística de los macrosistemas o de los sistemas con muchos grados de libertad, pero no en el movimiento del centro de gravedad de cada una de las partículas. Este último obedece a la mecánica reversible newtoniana, mientras que el segundo principio sobre la entropía concierne a la dinámica de muchas partículas, irreversible en el tiempo. Ambas ramas de la física no sólo no interfieren entre sí, sino que, según los conocimientos actuales, se compaginan sin problemas. Por lo demás, Einstein no abordó nunca explícitamente la carta de Röntgen.

Pregunta: A principios del siglo XX todavía se discutía si átomos y moléculas eran partículas “reales”. ¿Cuál fue el influjo de los trabajos de Einstein en este terreno?

Grossmann: Fundamentalmente, contribuyeron a un cambio de mentalidad acerca de la estructura molecular de los cuerpos físicos, sean éstos sólidos, líquidos o gaseosos. Al poder someterse a medición, los enunciados de Einstein demostraron que eran reales en el mismo sentido que las cargas y campos eléctricos



JAIDEEP MATHUR/SOCIEDAD AMERICANA DE FISIOLOGIA VEGETAL/*Spektrum der Wissenschaft*

2. LAS ESTRUCTURAS EN FORMA DE DIMINUTAS BURBUJAS del citoplasma de las células están sujetas también al movimiento browniano. De los peroxisomas aquí fotografiados a intervalos de dos segundos, dos de ellos muestran ese movimiento trémulo (*círculos y cuadrados*), mientras que los marcados con las cifras de 1 a 5 exhiben un desplazamiento neto.

y magnéticos, los cuantos de luz y tantas otras representaciones físicas. Y como los postulados einsteinianos se seguían de los enunciados de la teoría cinética molecular, su realidad señalaba la de las moléculas.

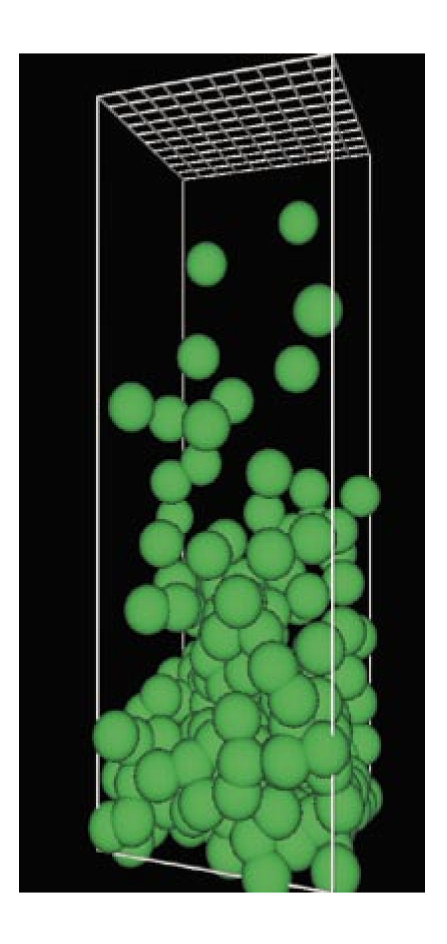
Respecto a la estructura molecular de la materia, Einstein fue sólo un precursor. Otro, Ludwig Boltzmann. Pero la contribución de Einstein al éxito final de esa teoría fue capital. Convenció a físicos tan escépticos e influyentes como Ernst Mach y Wilhelm Ostwald. En el debate en torno a los átomos, Einstein cambió profundamente el estado de los conocimientos al ampliar de modo sustancial los métodos de análisis y establecer nuevas relaciones comprobables mediante experimentos. Pero en los otros dos grandes trabajos de 1905, sobre la teoría de la relatividad y el efecto fotoeléctrico, modificó las ideas básicas de la física.

Pregunta: ¿Hay un resultado central de la teoría de la difusión que vaya más allá de la explicación del movimiento browniano?

Grossmann: Se unificaron la teoría cineticomolecular y la teoría macroscópica del calor. La cinemática, que hasta entonces sólo era válida para sistemas enrarecidos, es decir, los gases, podía ahora hacer afirmaciones que tenían validez también para sistemas condensados, es decir, líquidos, en los que las moléculas participantes, sean diminutas o gigantescas, interactúan unas con otras intensa y constantemente. La habilidad de Einstein consistió en considerar las magnitudes mensurables bajo distintos puntos de vista y establecer así conexiones entre ellas. Obtuvo fórmulas explícitas, que se pueden medir repetidas veces. A estas conexiones las llamamos hoy "relaciones de Einstein".

Pregunta: ¿Dónde desempeñan una función tales conexiones?

Grossmann: Por ejemplo, en las relaciones entre las fluctuaciones del equilibrio, por una parte, y la reacción de un sistema a las alteraciones externas, por otra. Hoy constituyen un pilar central en la investigación de muchos sistemas en la física, química, biología, neurología, materia blanda, estudios del tráfico, límites de ruido para aparatos de medición, movimiento de virus o sustancias activas, etc.



3. LAS PARTICULAS SUSPENDIDAS en un líquido (*verde, en esta simulación por ordenador*) se comportan como macromoléculas. A causa de la gravedad, su concentración disminuye exponencialmente con la altura.

MARK D. HAW/*Spektrum der Wissenschaft*

Pregunta: En su opinión, ¿qué campos de la investigación actual se benefician más de los trabajos de 1905?

Grossmann: Así formulada, la pregunta no se puede contestar. Con sus tres magnos trabajos de 1905, Einstein ha marcado e influido esencialmente en el desarrollo de la física. Sus frutos los damos hoy por evidentes. Nadie repara en su origen cuando se los utiliza por doquier. Hasta los investigadores querrían dar respuestas diferentes, según sus campos de interés. Cada joven generación aprende física siguiendo los enfoques de Einstein, sin ser consciente de ello.

Pregunta: ¿Cómo es que los trabajos de Einstein sobre el movimiento molecular browniano son hoy más citados por otros científicos que los que trataban de la teoría de la relatividad y del efecto fotoeléctrico, por los que, sin embargo, Einstein es mucho más conocido del público en general?

Grossmann: Quizás esté relacionado con que la ciencia moderna se haya vuelto muy interdisciplinaria. A la dinámica molecular se recurre hoy también en la biofísica, biología molecular, bioquímica, etc. Son campos en los que los fundamentos de la cinética molecular resultan de particular importancia para la mayoría de los fenómenos observables. Sencillamente, hay más campos científicos, y por eso más científicos recurren al estudio einsteiniano de la suspensión y análisis del movimiento browniano o al enfoque del que Einstein partía para abordar la estadística de los movimientos fluctuantes. Las células del cuerpo humano o las de los animales y plantas se componen de macromoléculas muy diferentes. Todas ellas exhiben difusión, movimiento térmico continuo y viscosidad hidrodinámica. Están, pues, sujetas a las regularidades einsteinianas halladas en 1905. Por tanto, se han de citar también sus trabajos en relación con ellas.

Pregunta: ¿De qué depende que el movimiento browniano no se pare con el paso del tiempo?

Grossmann: Forma parte y es indicador del eterno movimiento térmico de los átomos. "Calor" no es otra cosa que energía cinética de las moléculas, por grandes o pequeñas que sean. La energía térmica de cada una de estas moléculas es la misma, porque todas están en contacto entre sí. La velocidad de una molécula será tanto menor cuanto mayor sea su masa, pero siempre habrá movimiento. Todo choca con todo. Si se enfría, todo se ralentiza. Tan imposible como alcanzar el cero absoluto es detener el movimiento. A una temperatura finita, todo se mueve sin cesar.

El autor

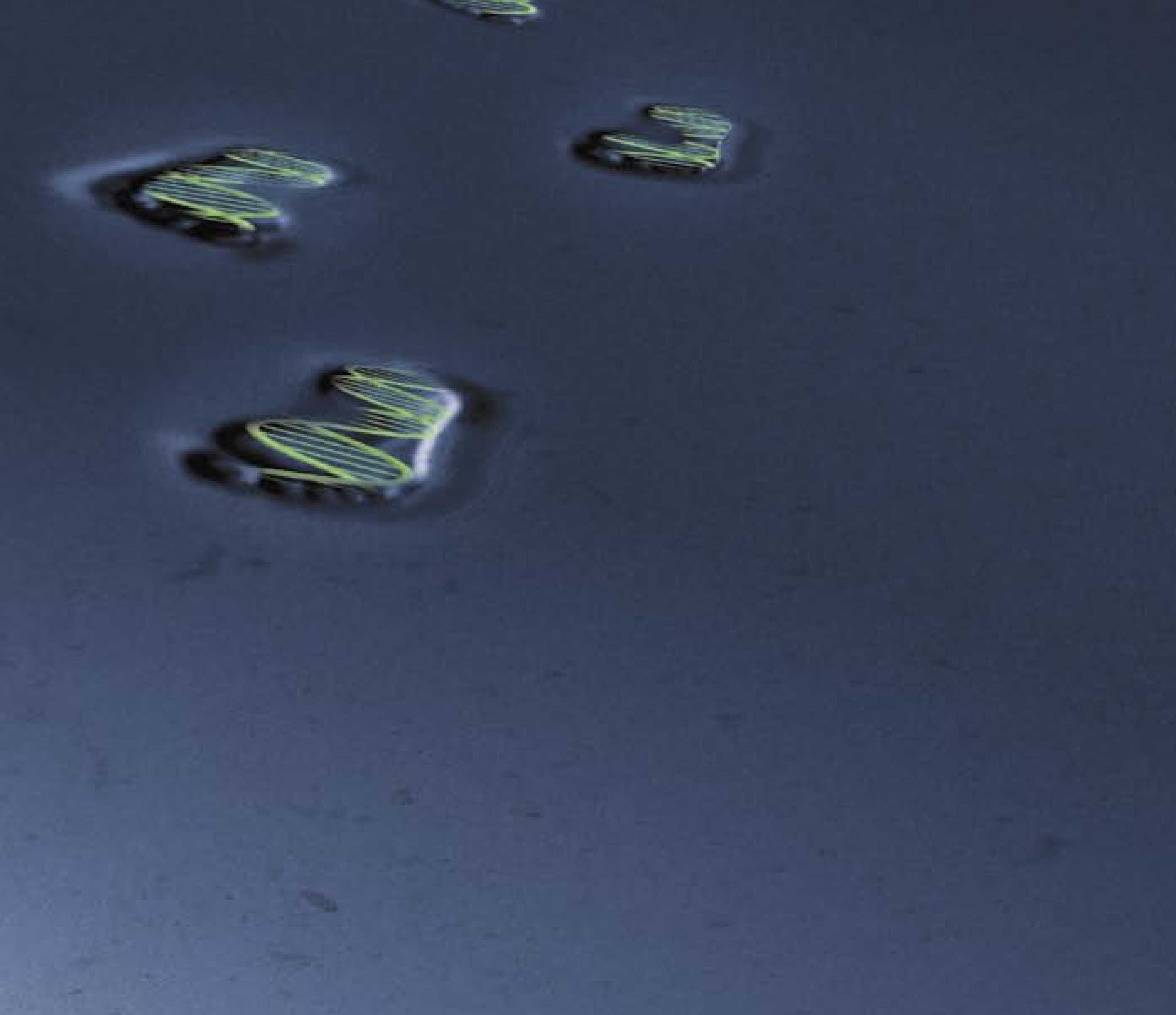
Georg Wolschin enseña física en la Universidad de Heidelberg.

Mutaciones pioneras

Un tipo de mutaciones génicas que a menudo causan enfermedades en el hombre permiten seguir la pista de las migraciones y el crecimiento de poblaciones específicas en el transcurso de miles de años

Dennis Drayna

SLIM FILMS



Dos hombres de mediana edad viven a miles de kilómetros de distancia en los Estados Unidos. No se conocen, pero tienen un rasgo común: la absorción de hierro en su organismo es tan eficaz que, en vez de ventajosa, resulta dañina, hasta terminar por provocar un fallo multiorgánico letal. Este trastorno, la hemocromatosis hereditaria, afecta con frecuencia a personas que han heredado de ambos progenitores la misma mutación génica, una alteración que se originó hace largo tiempo en un individuo que vivía en Europa. La mutación viajó luego en el tiempo y el espacio, a través de la progenie de ese europeo. En la actualidad, unos 22 millones de estadounidenses poseen al menos una copia del gen mutado. El antepasado, desaparecido hace largo tiempo, se considera el fundador o pionero de esa población; a su legado génico se le denomina "mutación pionera".

Se han descubierto miles de mutaciones responsables de enfermedades humanas, pero las pioneras se apartan de lo común. Las víctimas de numerosas enfermedades genéticas mueren antes de reproducirse; los genes mutados no se transmiten. Las mutaciones pioneras, en cambio, suelen perdonar la vida a sus portadores, para así pasar a la descendencia. Algunos de los trastornos derivados de estas mutaciones presentan una notable frecuencia; nos referimos a la hemocromatosis hereditaria antes mencionada, la anemia falciforme y la fibrosis quística. Pero, ¿por qué la evolución conserva mutaciones en apariencia perjudiciales en lugar de deshacerse de ellas?

Los expertos estudian las mutaciones patológicas a fin de establecer criterios de identificación de las poblaciones de riesgo. Buscan también abrir nuevas vías para la prevención y el tratamiento de los trastornos relacionados con estas mutaciones. Siguiendo esa senda han descubierto que las mutaciones pioneras vienen a ser las huellas que la humanidad ha ido dejando en la estela del tiempo: constituyen una poderosa herramienta antropológica para el rastreo de la historia de las poblaciones y sus migraciones en el planeta.

Mutaciones pioneras, mutaciones singulares

Para comprender la singularidad de las mutaciones pioneras y la importancia de la información que encierran, debemos antes recordar algunos aspectos de las mutaciones en general. Las mutaciones responden a alteraciones que se producen de forma aleatoria en nuestro ADN. La mayoría se reparan o eliminan al nacer, sin que se transmitan a la siguiente generación. Las de línea germinal, en cambio, se transmiten, a menudo con graves consecuencias para la descendencia: más de 1000 enfermedades humanas se deben a mutaciones génicas.

Aunque atípicas, las mutaciones pioneras encajan en la categoría de las de línea germinal. Las enfermedades hereditarias suelen seguir un principio general: mutaciones distintas en el mismo gen causan la misma enfermedad. Como consecuencia, varias familias afectadas por la misma enfermedad portan distintas versiones del gen mutado responsable del trastorno. Por ejemplo, la hemofilia, un trastorno hemorrágico, se debe a mutaciones en el gen que codifica el factor VIII, un componente del sistema de coagulación sanguínea; en general, cada caso de hemofilia responde a una mutación distinta en el gen del factor VIII (se han localizado mutaciones en cientos de sitios en el gen).

Una misma mutación puede estar detrás de enfermedades diversas. Acostumbra presentarse en dos formas: como mutación de punto caliente ("hotspot") o como mutación pionera. Un punto caliente corresponde a un par de bases de ADN con una elevada propensión a la mutación. Por ejemplo, la acondroplasia, una forma común de enanismo, suele deberse a una mutación en el par 1138, en el gen *FGFR3*, situado en el brazo corto del cromosoma humano 4. Los individuos que presentan mutaciones de punto caliente no suelen estar relacionados entre sí; el resto de su ADN varía de uno a otro, como ocurre entre las personas sin nexo de parentesco. Pero las mutaciones pioneras, que pasan incólumes de una generación a otra, difieren de las mutaciones espontáneas de punto caliente.

En cada persona portadora de una mutación pionera, el ADN alterado se halla embebido en un tramo más largo de ADN idéntico al que existía en el individuo fundador (por ello se le denomina "idéntico por descendencia"). Esta región génica corresponde a un haplotipo. Si se comparte un haplotipo, se comparte también un antepasado: el fundador de la mutación. El estudio de los haplotipos arroja luz sobre el origen de las mutaciones pioneras y permite seguir el rastro de las poblaciones humanas.

A partir de la longitud del haplotipo, que disminuye con el tiempo, se determina la edad de una mutación pionera. El haplotipo original corresponde al cromosoma completo que aloja la mutación. El fundador transmite ese cromosoma a la descendencia, que recibe también otro cromosoma, el de la pareja del fundador, pero éste sin mutación. Los dos cromosomas, uno de cada progenitor, intercambian entre sí de forma aleatoria segmentos de ADN, como si fueran dos mazos de naipes que se cortan y barajan.

Imaginemos que marcamos uno de los naipes. Tras cortar y mezclar una vez, las cartas que lo rodean siguen siendo casi las mismas que en la distribución de partida. Igual le sucede a la mutación: tras una sola recombinación, seguirá instalada en una larga sección del ADN del fundador. Pero conforme las cartas se siguen barajando, el naipe marcado se hallará rodeado de un número cada vez menor de sus vecinas originales. Del mismo modo, el haplotipo que incluye el gen mutado se reduce poco a poco con cada recombinación sucesiva.

Por tanto, una mutación pionera joven (de escasos cientos de años de antigüedad) se encontraría hoy en medio de un largo haplotipo. Una mutación pionera antigua (de decenas de miles de años de edad), en cambio, se hallaría en un haplotipo de longitud reducida.

La aberración del gen de la hemocromatosis constituye sólo una de entre la extensa lista de mutaciones pioneras conocidas. Se han estudiado bastantes ya en las poblaciones europeas; otras se han identificado recientemente en americanos indígenas, asiáticos y africanos. Sorprende la elevada frecuencia de las mismas, que supera en cientos o miles de veces la de las mutaciones patológicas típicas. En su mayoría, las alteraciones génicas que causan enfermedades se dan entre uno de cada varios miles y uno de cada varios millones de individuos. Las mutaciones pioneras, en cambio, afectan a un porcentaje notable de la población.

Pero, ¿no debería la evolución deshacerse de estos genes dañinos en vez de conservarlos? Esta aparente

Resumen/La historia escrita en el ADN

- Una mutación pionera constituye una clase especial de mutación génica. El tramo de ADN en que se inscribe (haplotipo) es idéntico en todos los individuos que la portan: comparten un antepasado común, el fundador, o pionero, en quien apareció la mutación.
- La longitud del haplotipo determina la edad de la mutación pionera. La frecuencia de éste en la población revela la expansión geográfica de la progenie del fundador. Ambos datos arrojan luz sobre las migraciones humanas en el transcurso de miles de años.
- Conforme las poblaciones se mezclan, las mutaciones patológicas hoy asociadas a determinados grupos étnicos adoptan una distribución más aleatoria. En el futuro, la evaluación del riesgo de padecer tales enfermedades ya no se basará en criterios étnicos, sino en análisis del ADN.

MUTACIONES PIONERAS Y DE PUNTO CALIENTE

Imaginemos un grupo de pacientes que padecen la misma enfermedad y son portadores de la misma mutación en un punto dado de su ADN. ¿Cómo podemos saber si se trata de una mutación pionera o de punto caliente? En la secuencia del ADN circundante se halla la solución.

Supongamos que la mutación que comparten los pacientes consiste en un cambio de una timina (T) por una adenina (A) (*rojo, abajo*). Si A correspondiera a una mutación pionera, la secuencia circundante sería idéntica en todos los pacientes, pues la habrían heredado de un antepasado común. Pero si A fuese una mutación de punto caliente, surgida de forma espontánea en un sitio donde el ADN es propenso al error, las secuencias adyacentes mostrarían, además, otras alteraciones (*amarillo*) en los sitios donde el ADN tiende a variar sin causar enfermedad. La anemia falciforme, que se caracteriza por la deformación de los hematíes (*fotografía superior*), se origina habitualmente por una mutación pionera. La acondroplasia, una forma de enanismo en humanos (*fotografía inferior*), responde a una mutación de punto caliente.



Sitios de variación normal

Secuencia normal ▸ GATTCACAGGTCTCTATCCGAATCGATTCCAT
Mutación ▸ GATTCACAGGTCTCAATCCGAATCGATTCCAT

Cromosomas con mutación pionera
GATTCACAGGTCTCAATCCGAATCGATTCCAT
GATTCACAGGTCTCAATCCGAATCGATTCCAT
GATTCACAGGTCTCAATCCGAATCGATTCCAT
GATTCACAGGTCTCAATCCGAATCGATTCCAT

Cromosomas con mutación de punto caliente
GATTCTCAGGTCTCAATCCGAATCCATTCCAG
GATTCACAGGTCTCAATCCGAATCCATTCCAG
GATTCTCAGGTCTCAATCCGAATCGATTCCAT
GATTCACAGGTCTCAATCCGAATCCATTCCAT

Mutación



ALISON KENDALL (*ilustración*); GOPAL MURTI *Photo Researchers, Inc.* (*fotografía de arriba*); WELLCOME PHOTO LIBRARY (*fotografía de abajo*)

anomalía esconde una pista de por qué las mutaciones pioneras persisten y se expanden por tierra y mar, y a lo largo del tiempo.

Sucede que, bajo algunas circunstancias, las mutaciones pioneras se revelan beneficiosas. Esa es la clave. En su mayoría, las mutaciones pioneras son recesivas: sólo quien hereda dos copias del gen afectado, una de cada progenitor, sufre la enfermedad. Las personas con sólo una copia (más numerosas) se denominan portadores; pueden pasar el gen mutado a sus hijos y no manifestar ellas mismas síntomas de la enfermedad. Esa copia única de la mutación pionera confiere al portador una ventaja evolutiva.

Por ejemplo, se piensa que los portadores de la mutación de la hemocromatosis hereditaria están protegidos de la anemia ferropénica (una deficiencia férrica que antaño resultaba de suma gravedad), porque la proteína que codifica el gen mutado hace que la absorción de hierro se produzca con mayor eficacia que en aquellos individuos con dos copias normales del gen. Por tanto, los portadores de esta mutación pionera contaban con una ventaja cuando el hierro escaseaba en la dieta.

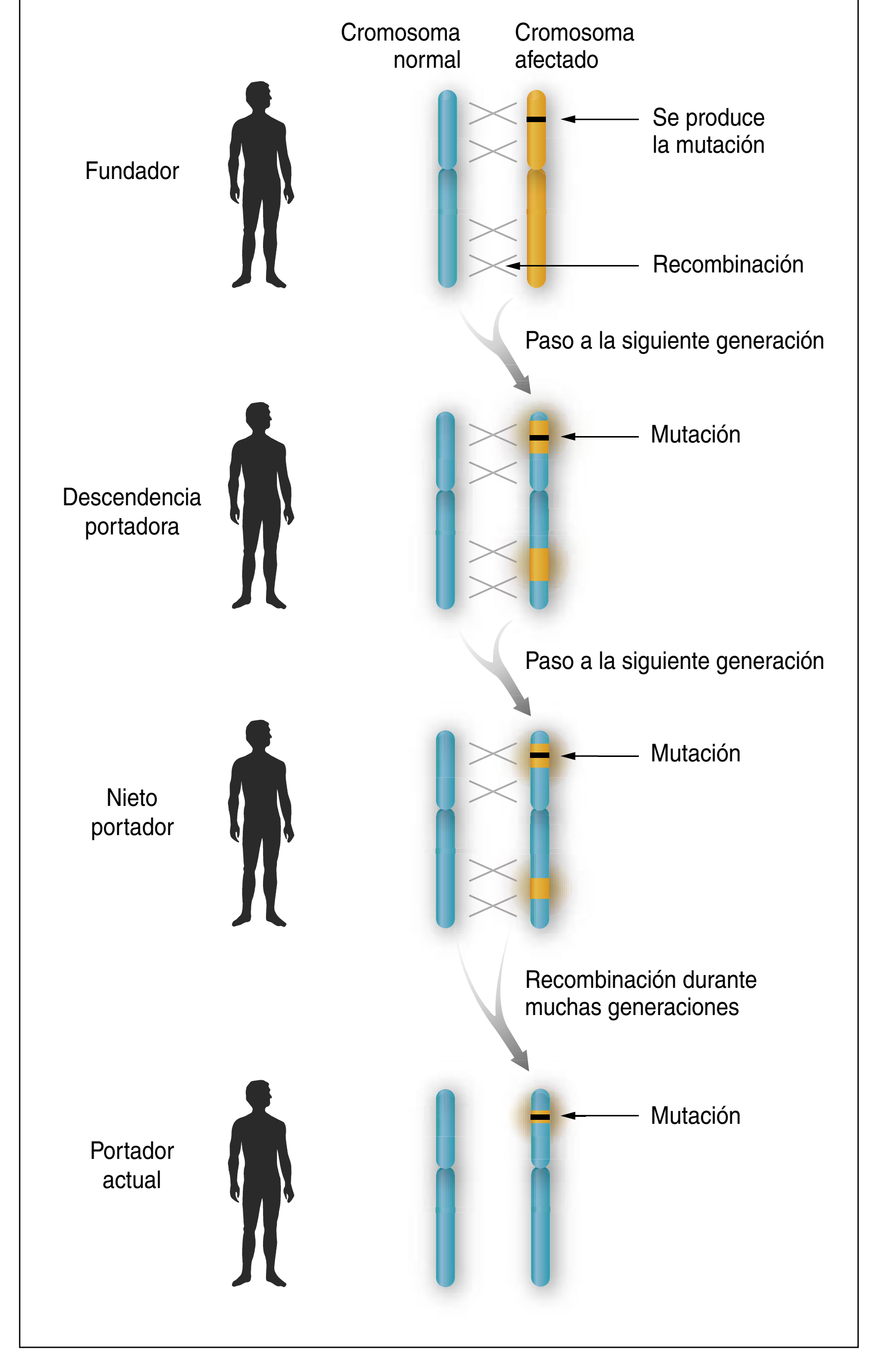
Tal vez el ejemplo más conocido de este tipo de mutaciones de doble filo sea la responsable de la anemia falciforme. La alteración que causa este tipo de anemia se originó, tal parece, en repetidas ocasiones en zonas castigadas por la malaria de Africa y Oriente Medio. Una sola copia del gen de los hematíes falciformes confiere al portador resistencia a la malaria. Dos copias, en cambio, reducen su esperanza de vida y le condenan al sufrimiento. La mutación de la anemia falciforme se encuentra hoy en cinco haplotipos distintos; ello sugiere que apareció de forma independiente en cinco momentos y en cinco fundadores. (Aunque la anemia falciforme acostumbra originarse en una mutación pionera, se dan casos que proceden de otras alteraciones génicas.)

La frecuencia de una mutación pionera en la población está gobernada por dos fuerzas que compiten: los individuos con dos copias morirán probablemente antes de reproducirse, pero los que portan sólo una copia presentan mayor posibilidad de sobrevivir que los carentes de copia alguna. Se da así una selección "de balanceo": los efectos beneficiosos operan a favor de la supervivencia del gen mutante, mientras que los perjudiciales lo hacen en contra, de forma que la frecuencia de la mutación se mantiene estable en el transcurso del tiempo.

Se desconoce la ventaja que otorgan algunas mutaciones pioneras relacionadas con determinadas patologías, lo que no empece que la presencia continua de un cierto gen apunte en el sentido beneficioso. Un descubrimiento reciente podría explicar la persistencia del factor V Leiden, una mutación en el gen del factor V, que es responsable de otro componente de la coagulación

EL ACORTAMIENTO DEL HAPLOTIPO

La región cromosómica (haplotipo) que rodea a una mutación pionera se va acortando de una generación a otra conforme los cromosomas se mezclan en el proceso de recombinación. En la ilustración, el individuo fundador posee un cromosoma amarillo con la mutación pionera y un cromosoma azul normal procedente del otro progenitor. Cuando el fundador produce espermatozoides u óvulos, los dos cromosomas intercambian segmentos. La descendencia hereda un nuevo cromosoma mixto, portador de la mutación y de otras partes del haplotipo pionero (*región amarilla*). Así, el intercambio génico que se produce a lo largo de las generaciones causa el acortamiento del haplotipo.



ALISON KENDALL

de la sangre. Esta mutación pionera, que portan el cuatro por ciento de los europeos, conduce a la trombosis (formación patológica de coágulos sanguíneos). En 2003, el equipo encabezado por Bryce A. Kerlin, del Hospital Hematológico del Sudeste de Wisconsin y del Colegio Médico de Wisconsin, demostraron que los afectados por esta mutación han adquirido resistencia a las infecciones bacterianas en el torrente sanguíneo (infecciones que en la era preantibiótica constituían una grave amenaza para la supervivencia y que hoy resultan todavía letales).

Un gen repartido por todo el mundo

Antes de la irrupción de los transportes modernos, las mutaciones pioneras cubrían largas distancias en viajes que solían durar decenas e incluso centenas de generaciones. La anemia falciforme migró desde el oeste de Africa hasta América en los barcos negreros; se propagó también por Europa. Una mutación pionera común en el gen *GJB2* causa sordera; se le ha seguido el rastro desde su origen en Oriente Medio a lo largo de dos rutas, una por la costa mediterránea hasta Italia y España, y la otra a lo largo de los valles de los ríos Rin y Danubio hacia el norte de Europa. Una mutación pionera en el gen *ABCA4*, que causa ceguera, parece que surgió en Suecia hace unos 2700 años y se diseminó por Europa meridional y occidental.

El ejemplo más extremo de migración lo ofrece una variabilidad genética de nuestro sentido del gusto. Alrededor de un 75 por ciento de los habitantes del planeta perciben amarga la feniltiocarbamida (PTC); no así el 25 por ciento restante. En el Instituto Nacional de la Salud y otras instituciones norteamericanas descubrimos en fecha reciente que una combinación de tres alteraciones génicas hace que se codifique un receptor de PTC que no detecta el amargor. Así pues, todos los individuos insensibles a la PTC descienden de un fundador que contaba con esas alteraciones. (Nuestro sentido del gusto amargo se ha desarrollado para protegernos de la ingesta de sustancias tóxicas vegetales; pero, ¿cuál sería la ventaja de la variante génica que no detecta ese sabor?

En nuestra opinión, el detector PTC ha perdido la sensibilidad hacia lo amargo para desarrollar sensibilidad hacia otra sustancia tóxica aún por identificar.)

La mutación insensible se halla en un tramo corto de ADN ancestral, de sólo 30.000 pares de bases en algunos portadores; ello indica que se trata de una mutación pionera antiquísima: de más de 100.000 años. En 2004, un muestreo de alcance mundial reveló la existencia de siete formas del gen del PTC en Africa subsahariana. Pero sólo las dos variantes extremas (la más sensible y la más insensible) se han encontrado con una frecuencia notable fuera de las poblaciones africanas. De las cinco formas restantes, una aparece sólo de forma ocasional en poblaciones no africanas (nunca en los naturales del Nuevo Mundo), mientras que las otras cuatro son exclusivas de Africa.

La mutación insensible a la PTC aporta valiosa información sobre las primeras migraciones humanas. Su actual distribución y frecuencia respalda la hipótesis del origen africano de nuestra especie (la teoría "fuera de Africa"). A tenor de los datos antropológicos y arqueológicos, la población original del hombre moderno vivó en Africa; un reducido subgrupo de la misma emigró hace unos 75.000 años y se distribuyó por los cinco continentes. Todas las poblaciones no africanas descienden de ellos. Pero, además, esta mutación arroja luz sobre una de las cuestiones más controvertidas de la antropología moderna: conforme nuestros antepasados *Homo sapiens* se expandían por el mundo, ¿se mezclaron con los homínidos más arcaicos que se encontraron en Europa y Asia?

Estos homínidos arcaicos contarían con sus propias variantes del gen del receptor de PTC, seleccionado positivamente para defenderse de las toxinas de la flora local. Si otros homínidos tuvieron descendencia con parejas *Homo sapiens*, cabría esperar formas distintas de este gen en poblaciones europeas, del oriente de Asia o del sudeste asiático. Pero no se han encontrado. El estudio de mutaciones pioneras en el hombre moderno indica que no se produjo ningún entrecruzamiento exitoso entre *H. sapiens* y otros grupos humanos durante esta gran emigración africana hace decenas de miles de años.

En busca del fundador

El examen del haplotipo donde reside el gen de la hemocromatosis hereditaria demuestra que la conjunción de los registros históricos y el análisis genético de las poblaciones actuales arroja nueva luz sobre las causas y la historia de un determinado trastorno. En los años ochenta del siglo pasado, antes de que se identificase el gen de esta enfermedad, se observó que casi todos quienes la padecían compartían un segmento de ADN

Genes antañones en la medicina moderna

El estudio de las mutaciones pioneras descubre profundas implicaciones para el avance de la medicina. De entrada, facilita la identificación de individuos que deberían someterse a pruebas diagnósticas de determinados trastornos. El riesgo de contraer una enfermedad se estima en función del perfil étnico del individuo; a partir de esa información se decide qué análisis adicionales conviene realizar. La anemia falciforme, por ejemplo, se presenta mayoritariamente en individuos de ascendencia africana. Sin embargo, con el intercambio genético entre razas y pueblos, la asignación del origen geográfico ancestral o de la especificidad étnica de una persona entrañará cada vez mayor dificultad. Conforme esta herramienta diagnóstica basada en la etnicidad vaya perdiendo eficacia, la evaluación del riesgo de una enfermedad o la determinación de la etiología de los síntomas que presente un paciente se basarán en análisis de ADN. El hallazgo de mutaciones pioneras, ahora que las poblaciones humanas permanecen todavía genéticamente distinguibles, facilitará la identificación de los genes responsables de numerosos trastornos.

De hecho, algunas mutaciones pioneras pueden considerarse casos especiales de un grupo mayor de variantes génicas patológicas. Aunque no sabemos todavía de qué alteraciones se trata, se les supone un origen remoto. Tal y como se señala en el artículo, estas variantes patológicas debieron resultar beneficiosas para nuestros antepasados; por ello se propagaron. Pero el encuentro de estos genes antañones, aparecidos en hábitats remotos, con el ambiente y estilo de vida modernos origina enfermedades, que se han convertido en trastornos graves.

El análisis del ADN revestirá suma importancia, pues estas alteraciones génicas no nos predisponen sólo a enfermedades hereditarias raras, sino también a trastornos comunes. Pensemos en las variantes génicas cuya función original era facilitar la síntesis del colesterol, si bien hoy conllevan un nivel de colesterol demasiado elevado; o en las variantes que potenciaban la retención de la sal y hoy provocan hipertensión.

Cuando se halle la correlación entre perfiles genéticos específicos y determinadas enfermedades graves comunes, la genética dejará de ser una subespecialidad de la medicina dedicada a los trastornos raros para ocupar el escenario central en la prevención, el diagnóstico y el tratamiento de la enfermedad humana.



EL PERFIL ETNICO ofrece en la actualidad una herramienta diagnóstica rápida para estimar el riesgo de padecer determinadas enfermedades. Conforme el acervo génico de la humanidad se vaya mezclando, deberá recurrirse al análisis del ADN para evaluar la predisposición a esos trastornos.

LARRY WILLIAMS *Corbis*

en una región del cromosoma 6. Se trataba de algo asombroso. En principio, la mayoría de estos pacientes no mantenían ninguna relación de parentesco y, por tanto, era de esperar que su secuencia génica presentara diferencias aleatorias. Habrá, pues, que inferir que los pacientes con hemocromatosis hereditaria debían descender de un antepasado común, desaparecido tiempo atrás; además, el gen responsable de la enfermedad se hallaba probablemente dentro del tramo compartido.

A partir de esta hipótesis, nuestro grupo llevó a cabo en los pasados años noventa un análisis génico detallado, en 101 pacientes, de la región de interés del cromosoma 6. Examinamos también el ADN de 64 individuos control que no presentaban hemocromatosis. En su mayoría, los pacientes compartían una extensa región de varios millones de pares de bases. Unos pocos, no obstante, coincidían sólo en una fracción reducida. Cuando comparamos la sección del cromosoma 6 presente en *todos* los pacientes, descubrimos que contenía 16 genes. Trece de ellos codificaban histonas, las proteínas que se unen al ADN y lo pliegan para formar estructuras cilíndricas visibles al microscopio óptico durante la división celular. Las histonas, y los genes que las determinan, son casi idénticas para todos los seres vivos; por ello descartamos su implicación en la hemocromatosis. Quedaban, pues, sólo tres candidatos.



LA SELECCION DE BALANCEO mantiene en circulación a un gen potencialmente deletéreo. En regiones afectadas por la malaria (que transmiten los mosquitos) el portar una sola copia del gen de la hemoglobina mutado supone una protección: aumenta las posibilidades de supervivencia. Heredar dos copias de la mutación, en cambio, causa anemia falciforme y reduce la tasa de supervivencia. El balance de estas dos fuerzas competidoras conduce a la estabilización de la mutación de la anemia falciforme en la población.

Dos de los tres genes restantes eran idénticos en los pacientes con hemocromatosis y los individuos control sanos. Pero el ahora denominado *HFE* incluía una mutación que estaba presente en las personas con hemocromatosis y llamativamente ausente en aquellos que no presentaban ninguna alteración del metabolismo del hierro. Aquél debía ser, pues, el gen de la hemocromatosis hereditaria.

Hallada la mutación pionera, cabía preguntarse quién fue el fundador, cuándo y dónde vivió. Genéticos, antropólogos e historiadores se unieron en busca de respuesta. De la cosecha provisional se desprendía ya que la hemocromatosis hereditaria se da en toda Europa, aunque con incidencia mayor en las regiones septentrionales. Además, en el norte, la mutación pionera aparece en casi todos los pacientes; en el este y el sur de Europa, en cambio, en menos de dos tercios de los afectados. El tercio restante poseía alguna otra mutación en *HFE* o quizá sufría un trastorno del metabolismo del hierro completamente distinto.

Exámenes genéticos más detallados centrados en el noroeste de Europa revelaron que esta mutación pionera se presenta con mayor frecuencia en Irlanda, el oeste de Gran Bretaña y la Bretaña francesa: un patrón que se solapa, casi a la perfección, con la distribución actual de los celtas.

Los celtas dominaron en Europa central hace más de dos milenios. La expansión del Imperio Romano

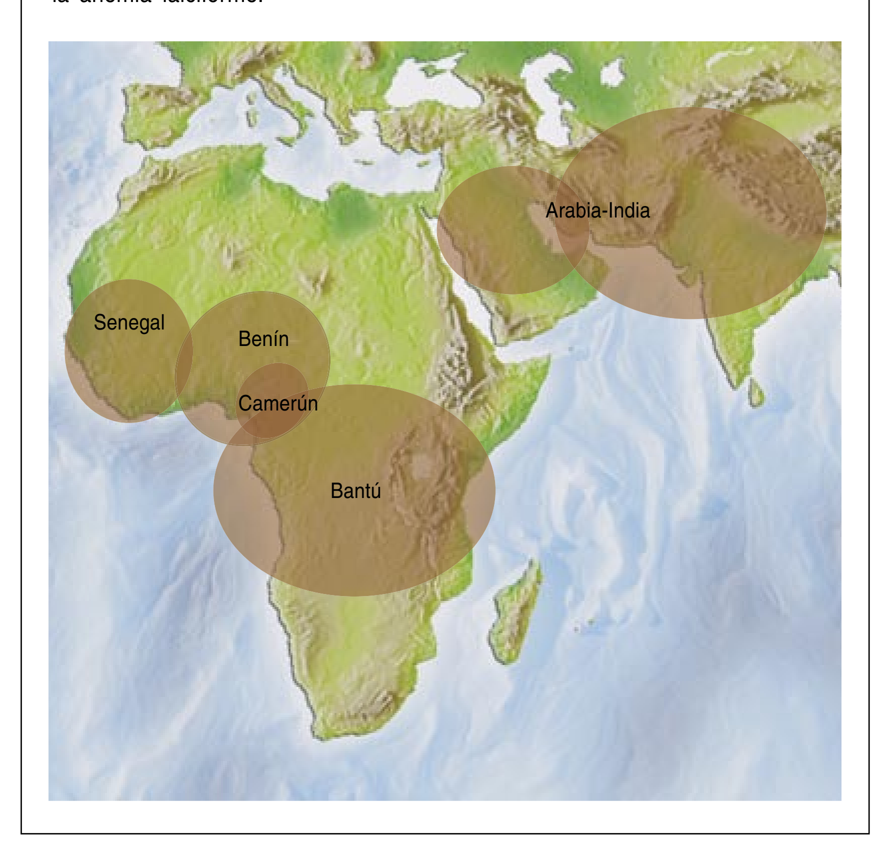
Mutaciones pioneras de interés

Gen afectado	Trastorno	Origen de la mutación	Migración	Posible ventaja de una copia
HFE	Exceso de hierro	Extremo noroeste de Europa	Al sur y al este, a través de Europa	Protección frente a la anemia
CFTR	Fibrosis quística	Sudeste de Europa/Oriente Medio	Al oeste y al norte, a través de Europa	Protección frente a la diarrea
HbS	Anemia falciforme	Africa/Oriente Medio	Hacia el Nuevo Mundo	Protección frente a la malaria
FV Leiden	Coágulos sanguíneos	Europa occidental	Todo el mundo	Protección contra la sepsis
ALDH2	Toxicidad alcohólica	Extremo oriental de Asia	Al norte y al oeste, a través de Asia	Protección contra el alcoholismo y posiblemente la hepatitis B
LCT	Tolerancia a la lactosa	Asia	Al oeste y al norte, a través de Eurasia	Permite el consumo de leche de animales domésticos
GJB2	Sordera	Oriente Medio	Al oeste y al norte, a través de Europa	Desconocido

ALISON KENDALL

ORIGENES POCO COMUNES

Aunque todas las personas con anemia falciforme son portadoras de la misma alteración génica, ésta se presenta en el seno de cinco haplotipos: ello indica que la mutación apareció de forma independiente en cinco momentos de la historia de la humanidad. Así se indica por áreas en el mapa. Se trata de los haplotipos de Senegal, Benín, Bantú, Arabia-India, o el recientemente descubierto de Camerún. El ocho por ciento de los afroamericanos son portadores de al menos una copia de la mutación de la anemia falciforme.



les obligó a desplazarse hacia el norte y el oeste; pero hubo quien se mezcló con los europeos del sur, permaneciendo en su emplazamiento original. ¿Se originó la mutación pionera de la hemocromatosis en el centro de Europa y progresó hacia el norte en movimientos migratorios? ¿Se originó acaso en el norte? La investigación acometida en el ADN circundante (haplotipo) en el cromosoma 6 abrió la puerta a una posible respuesta.

La gran longitud del haplotipo moderno indica que se trata de una mutación pionera joven: habría aparecido hace sólo unas 60 o 70 generaciones, alrededor del 800 d.C. Una fecha más temprana indicaría que el fundador vivió en Europa central y que la mutación se extendió hacia el norte y el oeste, al ser empujados sus descendientes por una Roma en expansión. Pero el Imperio Romano había caído ya en el 800, por lo que nuestra mutación pionera debió de originarse en el noroeste de Europa, para luego distribuirse hacia el sur y el este a través de la progenie del fundador.

Luigi Cavalli-Sforza y otros antropólogos habían estudiado con anterioridad otros tipos de variantes de ADN para el rastreo de poblaciones. Las mutaciones pioneras añaden ahora una nueva dimensión a los estudios genéticos: la longitud del haplotipo determina la edad de una mutación; la frecuencia del haplotipo en la población indica la expansión geográfica de la descendencia del individuo fundador.

Desde el punto de vista bioquímico, todos los humanos somos miembros de una misma familia. Compartimos una herencia génica. Además de confirmar la hipótesis del origen africano de nuestra especie, el análisis de las mutaciones pioneras ha revelado progenies comunes de otros grupos sin relación de parentesco manifiesta. (Una investigación reciente llevada a cabo por David B. Goldstein, de la Universidad Duke, ha demostrado un inesperado vínculo genético entre celtas y vascos.) Futuras investigaciones sobre las mutaciones pioneras y sus haplotipos ahondarán en los nexos genéticos que expliquen las migraciones y el crecimiento de las poblaciones humanas que nos han llevado hasta la situación actual. Arrojarán luz también sobre las raíces del árbol de la familia humana.

ALISON KENDALL

El autor

Dennis Drayna, director de una sección en el norteamericano Instituto Nacional para la Sordera y otros Trastornos de la Comunicación, se licenció en la Universidad de Wisconsin-Madison en 1975. Obtuvo su doctorado por la Universidad de Harvard en 1981. Tras realizar una estancia posdoctoral en el Instituto Howard Hughes de Investigaciones Médicas de la Universidad de Utah, trabajó catorce años en la industria, período en el que identificó varios genes humanos implicados en enfermedades cardiovasculares y metabólicas.

Bibliografía complementaria

THE GREAT HUMAN DIASPORAS: THE HISTORY OF DIVERSITY AND EVOLUTION. Luigi Cavalli-Sforza. Addison-Wesley, 1995.

DE AFRICA ¿UNA... Y OTRA VEZ? Ian Tattersall en *Investigación y Ciencia*, págs. 20-28; junio 1997.

NATURAL SELECTION AND MOLECULAR EVOLUTION IN PTC, A BITTER-TASTE RECEPTOR GENE. S. Wooding, U. K. Kim, M. J. Bamshad, J. Larsen, L. B. Jorde y D. Drayna en *American Journal of Human Genetics*, vol. 74, n.º 4, págs. 637-646; 2004.

Desarrollo de estomas

Los estomas son estructuras epidérmicas distribuidas en patrones regulares y necesarias para el intercambio gaseoso entre la planta y la atmósfera

Laura Serna

Estructuras características de las plantas terrestres, los estomas son aberturas bicelulares y epidérmicas de la superficie aérea del vegetal. En *Arabidopsis thaliana*, una crucífera cosmopolita, los estomas dibujan bellos patrones. Los observamos lo mismo en órganos embrionarios —cotiledones o el hipocotilo— que en estructuras adultas —hojas, tallos florales y verticilos florales—. Los estomas de *A. thaliana* aparecen rodeados por tres células epidérmicas, o células subsidiarias. El conjunto pentacelular se denomina complejo estomático anisocítico.

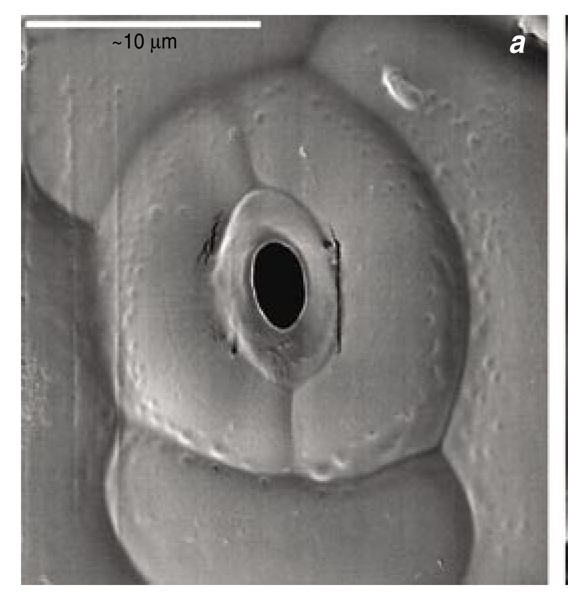
Cada estoma consta de dos células oclusivas que delimitan un poro, cuya apertura y cierre se regula por cambios en la turgencia de las células oclusivas. Los cambios de turgencia se producen a través del intercambio de agua y iones entre células oclusivas y células subsidiarias. Mediante la apertura y cierre del poro, las plantas evitan una pérdida excesiva de vapor de agua, que podría comprometer su supervivencia, y captan CO_2, para iniciar el proceso fotosintético.

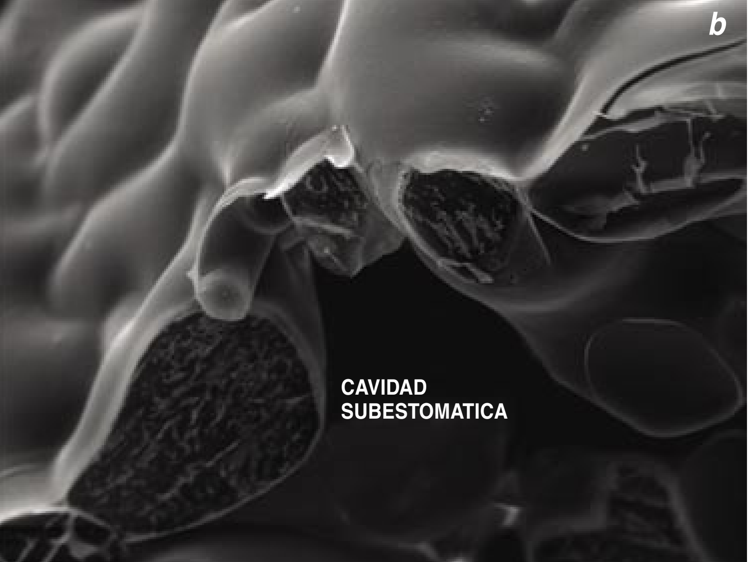
El estoma se ha convertido en centro de atención de diversas disciplinas. Abordaré aquí su desarrollo y patrones de distribución.

Separación de estomas

Los diversos patrones de distribución comparten una característica común: los estomas nunca aparecen juntos, sino separados por células epidérmicas. *A. thaliana* no constituye ninguna excepción. ¿Qué mecanismos impiden la formación de estomas juntos en nuestra especie modelo?

Hace unos años, el grupo de Carmen Fenoll, cuando trabajaba en la Universidad Autónoma de Madrid (y del





1. LOS ESTOMAS son estructuras epidérmicas y bicelulares que rodean un poro estomático a través del cual penetra CO_2 en el interior de la planta y sale O_2 y H_2O a la atmósfera (*a*). El mesófilo, tejido fotosintético compuesto por varias capas y dispuesto debajo de la epidermis, se interrumpe por debajo del estoma y da lugar a la cavidad subestomática (*b*).

LAURA SERNA

que yo formaba parte), y el grupo de Thomas Altmann, del Instituto Max Planck, descubrieron que el estoma y las tres células subsidiarias circundantes se originaban a partir de una sola célula precursora. Ocurría así en Lansberg *erecta* y en C24, dos ecotipos de *A. thaliana*. Con otras palabras, los complejos estomáticos anisocíticos de estos ecotipos eran monoclónicos.

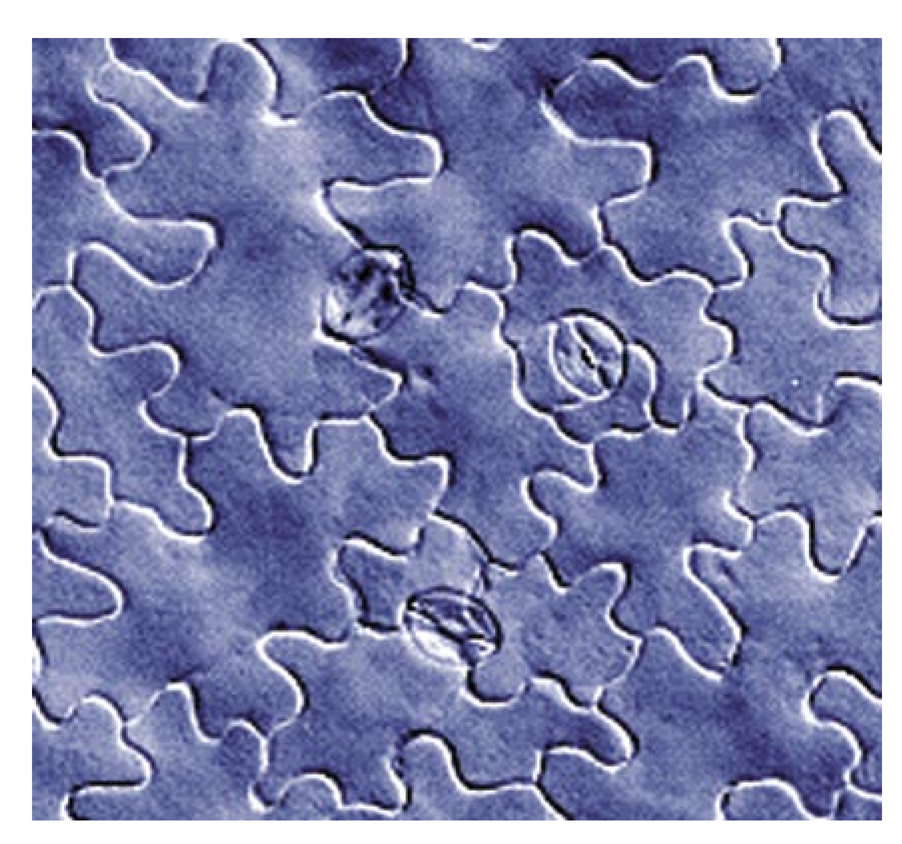
Además, la mayoría de estos complejos surgen de la misma secuencia espiral de divisiones celulares: tres divisiones asimétricas seguidas por una última división simétrica. La célula protodérmica, o "célula madre del meristemoide" (CMM), se divide de forma asimétrica y origina una célula de talla minúscula, el meristemoide (M1), y otra mayor, que será la primera célula subsidiaria.

El M1 sufre una segunda división celular asimétrica y genera la segunda célula subsidiaria y el segundo meristemoide (M2). Este M2 acomete la tercera y última división asimétrica, de la que resulta el tercer meristemoide (M3) y la tercera célula subsidiaria. Una vez que el M3 está rodeado de una dotación completa de tres células subsidiarias, adquiere una forma redondeada. Entonces, el tercer meristemoide acomete la última división, que es simétrica y origina las dos células oclusivas que componen el estoma. Este patrón de divisiones a partir de células protodérmicas crea los complejos estomáticos primarios.

Algunas células subsidiarias "copian" el programa de desarrollo de la célula madre del meristemoide y desarrollan complejos estomáticos secundarios. A su vez, células subsidiarias de estos complejos secundarios desarrollan complejos estomáticos terciarios, también mediante la adquisición de la identidad de CMM. Durante el desarrollo de estos complejos secundarios y terciarios, puede ocurrir que el M1 o el M2 adquieran una forma redondeada y se dividan simétricamente creando estomas. Tal formación prematura del estoma evita que el poro se rodee de una dotación completa de células derivadas de un solo precursor. En eso se apoya el desarrollo de complejos policlónicos.

¿Por qué los estomas de complejos secundarios o terciarios no se forman en contacto con los estomas de los primarios o secundarios, respectivamente? La razón estriba en la orientación del plano de división en la célula subsidiaria y el destino de las dos células hijas que resultan de esta división. Este plano se orienta de forma que no corta al estoma, y la célula más alejada de éste asume identidad de meristemoide.

La regla que rige la distribución de estomas —evitar el contacto directo entre los mismos— depende de dos factores: la formación de una dotación completa de células subsidiarias en torno al estoma y la orientación del plano de división de las células subsidiarias que asumen identidad de CMM, y posterior destino de las nuevas células que surgen de esta división. Al no desarrollarse juntos, los estomas pueden abordar su función de apertura y cierre del poro mediante el intercambio de agua y iones con las células epidérmicas vecinas y, en consecuencia, regular un eficaz intercambio de gases con la atmósfera.



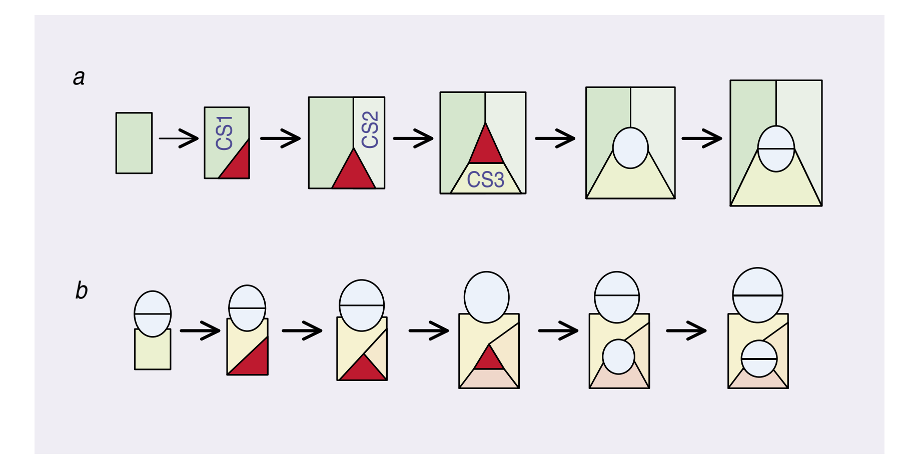
LAURA SERNA

2. LOS ESTOMAS ESTAN RODEADOS DE CELULAS NO ESTOMATICAS. En la hoja de *Arabidopsis thaliana*, las células epidérmicas se interponen entre estomas vecinos e impiden la contigüidad de los mismos. Llámase complejo estomático anisocítico al estoma más las tres células epidérmicas (subsidiarias) que lo rodean.

Función de SDD1

Se han aislado ya algunos mutantes que alteran el patrón de distribución de los estomas. O bien presentan estomas en contacto directo o muestran un índice estomático desmesurado con respecto a la planta silvestre. (Llámase índice estomático a la razón, multiplicada por cien, entre el número de estomas y el número de estomas más número de células epidérmicas.) Ejemplos de mutaciones que determinan una disposición contigua de estomas son la *tmm* (del inglés "too many mouths") y *flp* (del inglés "four lips"). Ejemplos de mutaciones que determinan un índice estomático desmesurado son *sdd1-1* (del inglés "stomatal density and distribution") y *hic* (del inglés "high carbon density").

El aislamiento de estos mutantes nos ha permitido comprender la función de los genes silvestres (evitar la contigüidad de estomas) y, en definitiva, la generación de los patrones de distribución de estomas.



3. EL DESARROLLO DE COMPLEJOS ESTOMATICOS en los ecotipos C24 y Landsberg *erecta* de *Arabidopsis thaliana* se desveló hace pocos años. Los complejos primarios se forman a partir de una célula protodérmica; siguen un patrón de divisiones celulares estereotipado (*a*). La célula protodérmica opera como "célula madre del meristemoide" (CMM) y se divide asimétricamente; aparece así la primera célula subsidiaria (CS1) y el primer meristemoide (M1). El M1 se divide también asimétricamente y da lugar al M2 y a la CS2. El M2 sufre la última división asimétrica de este proceso y origina el M3 y la CS3. Por fin, el M3 cambia de forma, se redondea y se divide simétricamente: genera el estoma. Algunas células subsidiarias pueden comportarse como CMM; entonces, mediante una secuencia de divisiones idéntica a la descrita, engendran complejos de orden secundario (*b*) a partir de la formación de complejos primarios. (Las células coloreadas en rojo representan los meristemoides.)

El mutante *sdd1-1*, aislado por el grupo de Thomas Altmann, determina la aparición de individuos dotados de un índice estomático superior al de plantas silvestres. Además, algunos de estos estomas establecen contacto con otros. Expuesto de una manera directa: a diferencia de su versión mutada *sdd1-1*, el gen *SDD1* silvestre, ya aislado, cumple la función de reducir el índice estomático y evitar que los estomas se formen juntos.

Dos cuestiones fundamentales

¿De qué modo el gen *SDD1* evita el incremento del índice estomático? ¿Cómo impide la formación de estomas adyacentes? Para responder a estas cuestiones críticas procedamos por pasos.

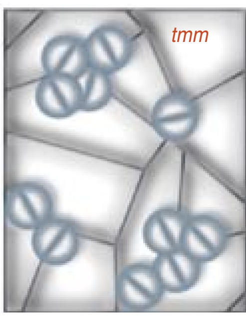
El análisis de los patrones de divisiones celulares durante el proceso de creación de complejos estomáticos en *sdd1-1* nos ha revelado que la mutación del gen *SDD1* multiplica el número de células protodérmicas que entran en la ruta de desarrollo estomático y establecen complejos primarios. En breve, multiplica el número de células protodérmicas que operan como célula madre del meristemoide. Asimismo, la mutación *sdd1-1* incrementa el número de complejos secundarios y terciarios desarrollados; permite incluso la producción de complejos estomáticos de orden cuaternario.

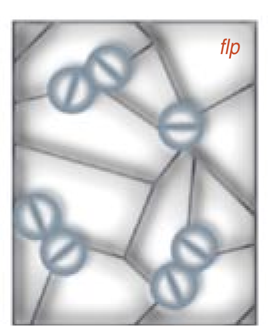
De lo anterior se infiere que el gen *SDD1* reduce el número de células protodérmicas que establecen complejos primarios; limita también el número de células subsidiarias que forman complejos secundarios o terciarios, y evita el desarrollo de complejos cuaternarios. Es decir, el gen *SDD1* reduce el número de células protodérmicas y subsidiarias que adquieren identidad de célula madre del meristemoide y, consecuentemente, desarrollan complejos estomáticos.

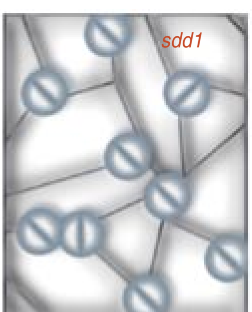
Además de regular el número de células que desarrollan complejos estomáticos, el gen *SDD1* controla el número de divisiones que se suceden desde la adquisición de identidad de CMM por células subsidiarias hasta la formación del estoma.

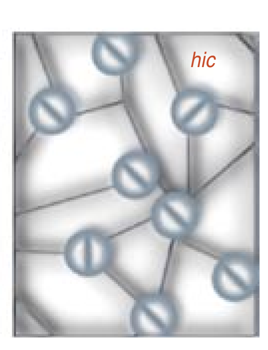
Con la mutación del gen, aumenta el número de complejos secundarios y terciarios que experimentan una formación prematura de estomas, es decir, tras la primera o segunda división celular asimétrica. Considerados en su conjunto, el elevado número de células que forman complejos estomáticos y la producción prematura de estomas explican el alto índice estomático que exhibe el mutante *sdd1-1* y dan respuesta











4. DETERMINADAS MUTACIONES EN ALGUNOS GENES repercuten en el patrón de distribución de estomas en la hoja o cotiledón de *Arabidopsis thaliana*. Los mutantes *four lips* (*flp*) y *too many mouths* (*tmm*) se caracterizan por presentar contigüidad de estomas. Los mutantes *stomatal density and distribution1-1* (*sdd1-1*) y *high carbon density* (*hic*) exhiben un índice estomático muy alto en comparación con las plantas silvestres. El mutante *sdd1-1* muestra, asimismo, estomas adyacentes. El elevado índice estomático de *hic* sólo se manifiesta ante concentraciones elevadas de CO_2.

LAURA SERNA

a la pregunta: ¿de qué modo el gen *SDD1* evita el incremento del índice estomático?

Otro aspecto interesante regulado por el gen *SDD1* guarda relación con la orientación del plano de división de las células subsidiarias que operan como CMM. Sabemos que en las plantas silvestres tal división se produce de manera que el plano no corte el estoma. Pero en las plantas con mutación *sdd1-1* estas células subsidiarias se dividen a menudo de suerte tal, que dicho plano sí establece contacto físico con el estoma y, en consecuencia, el meristemoide que surge de esta división se sitúa adyacente al estoma maduro. A su vez, el meristemoide se divide simétricamente para formar un estoma en contigüidad física con su vecino.

Por consiguiente, el gen *SDD1* evita la formación de esos estomas adyacentes al orientar adecuadamente el plano de división de las células subsidiarias que adoptan identidad de CMM; es decir, el plano no corta el estoma maduro. Y con ello respondemos a la segunda cuestión: ¿cómo impide la formación de estomas adyacentes?

Patrón de expresión génica

Se ha investigado también el patrón de expresión del gen *SDD1*. Sabemos que se circunscribe a los meristemoides, donde podría impedir la constitución prematura de estomas. No aparecen transcritos de ese gen en células subsidiarias que adquieren identidad de célula madre del meristemoide, un dato de interés si consideramos su papel en la orientación de las divisiones celulares. Tal vez se deba a que la proteína SDD1, determinada por dicho gen, emigra al apoplasto y se transporta hasta las células en las que actúa.

La proteína SDD1 consta de 775 aminoácidos. Destaca su estrecha homología con otros polipéptidos de la familia de las subtilasas. En los animales, ciertas proteasas homólogas a SDD1 activan hormonas, factores de crecimiento o receptores que participan en diversos procesos de desarrollo.

De acuerdo con las funciones desempeñadas por el gen *SDD1*, la proteína determina la activación de otra proteína, lo que impide la iniciación de algunos complejos estomáticos y la formación prematura de estomas. A esa hipotética proteína activada por la proteína SDD1 se le asigna un papel esencial en la correcta orientación del plano de división de células subsidiarias.

Cuatro funciones para TMM

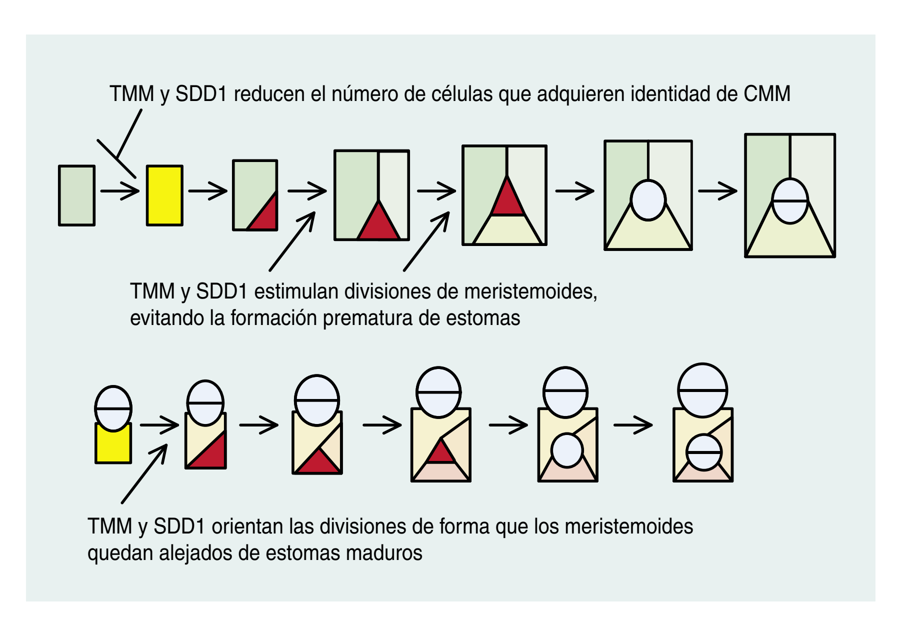
No fue tarea sencilla aislar y caracterizar los mutantes *tmm* y *flp*. Se invirtieron siete años en desentrañar la secuencia nucleotídica del gen silvestre *TMM*; pero seguimos sin conocer la naturaleza molecular del gen silvestre *FLP*.

Los dos genes mutantes, *tmm* y *flp*, fueron aislados por Fred Sack y su grupo, de la Universidad de Ohio. Se caracterizan por promover un elevado número de estomas contiguos: *too many mouths* ("muchas bocas") presenta juntos grupos de tres o más estomas y *four lips* ("cuatro labios") desarrolla parejas. La mutación *tmm*, además de formar estomas juntos en la hoja y cotiledón, inhibe su desarrollo en el tallo, hipocotilo y la epidermis adaxial del sépalo.

¿Cómo evita el gen *TMM* que se generen juntos los estomas? La respuesta nos ha llegado a través del análisis de la formación de estomas en la hoja o cotiledón del mutante *tmm*. Al estudiar el desarrollo de *tmm*, se observan varias diferencias con respecto a las plantas silvestres. Primera, la mutación *tmm* permite que las células epidérmicas en contacto con dos estomas o meristemoides reciban un destino de CMM, fenómeno que no ocurre nunca en plantas silvestres.

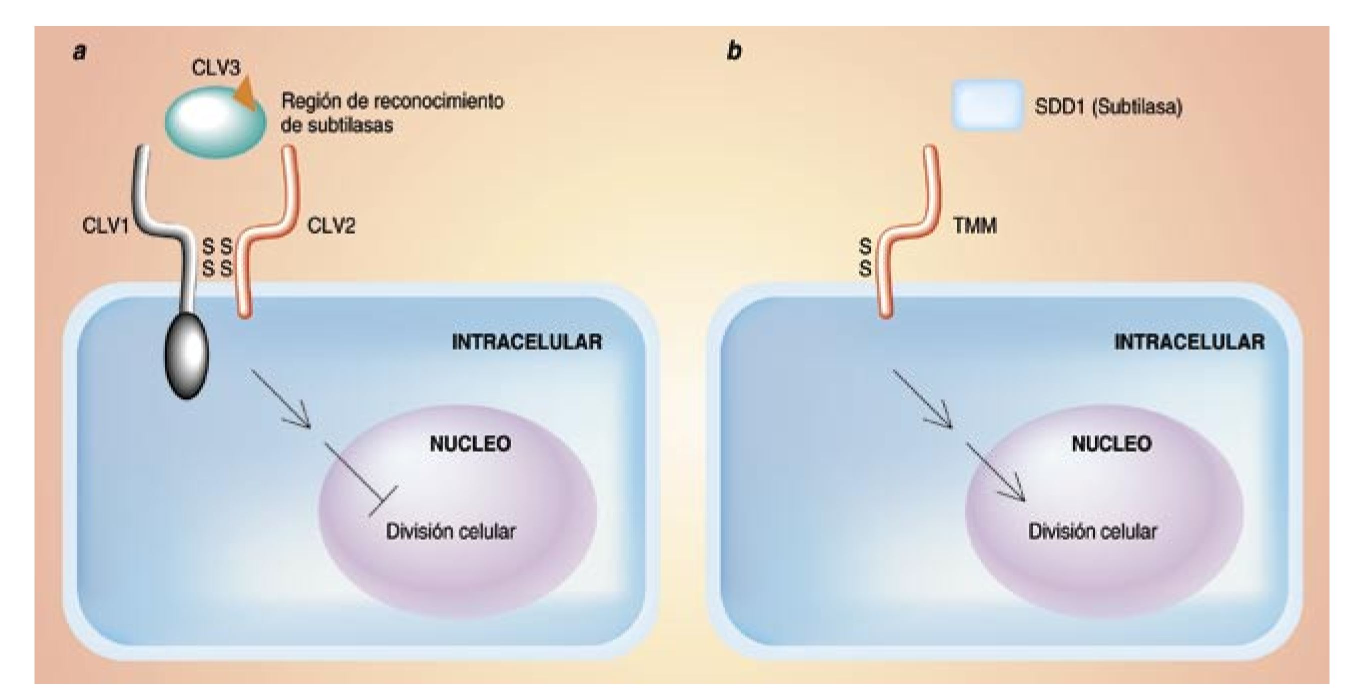
La segunda diferencia concierne a la posibilidad de corrección de errores durante el desarrollo. En las plantas silvestres, su maduración puede derivar en la formación de dos meristemoides juntos. Si esa posibilidad se materializa, uno de los meristemoides se divide y se engendran un nuevo meristemoide y una célula epidérmica; esta célula epidérmica se interpone entre el nuevo precursor estomático y el meristemoide vecino. No hay, pues, lugar para estomas contiguos. Las mutaciones *tmm* suprimen esta capacidad correctora; en consecuencia, el desarrollo de algunos meristemoides juntos culmina con la formación de estomas en contacto.

La tercera diferencia entre plantas *tmm* y su contrapartida silvestre atañe al número de divisiones que acontecen desde la adquisición de



5. LAS PROTEINAS TMM y SDD1 comparten varias funciones. Ambas reducen el número de células que se comportan como célula madre del meristemoide (CMM), limitan la formación prematura de estomas, tras la primera o segunda división asimétrica, y orientan el plano de división de células subsidiarías que adquieren identidad de CMM. El plano de división no establece contacto con el estoma maduro. (Las células coloreadas en rojo representan meristemoides; en amarillo se muestran las CMM.)

LAURA SERNA



6. DIVISIONES CELULARES DE MERISTEMOS Y MERISTEMOIDES. En el meristemo apical, la proteína CLAVATA3 (CLV3) constituye el ligando para el complejo CLV1/CLV2. La unión del ligando desencadena una ruta de transducción de señales que culmina con la represión del estado mitótico de las células del meristemo (*a*). La proteína TMM (de "too many mouths"), un receptor sin dominio citoplasmático y similar a CLV2, podría también interaccionar con otra proteína que proporcionase el dominio citoplasmático; se daría entonces un flujo de información del exterior al interior celular. Además, una molécula procesada por la subtilasa SDD1 (de "stomatal density and distribution 1") podría actuar como ligando y activar la proteína TMM, lo que mantendría la actividad mitótica de los meristemoides. La activación de TMM a través de este mecanismo reduciría el número de células iniciadoras de complejos estomáticos, evitaría la formación prematura de estomas, y regularía la orientación de los planos de división celular en CMM; con esto último evitaría que los nuevos meristemoides establecieran contacto con los estomas ya constituidos (*b*). La proteína CLV3 presenta un dominio que es reconocido por subtilasas, lo que refuerza el paralelismo entre el funcionamiento del meristemo apical y los meristemoides; esto, además, sugiere que un homólogo a CLV3 participa en el desarrollo estomático.

LAURA SERNA

la identidad de CMM hasta la formación de estomas. El mutante *tmm* presenta un elevado número de estomas desarrollados prematuramente, es decir, tras la primera o segunda división celular asimétrica.

A la orientación del plano de división en células subsidiarias que toman identidad de CMM nos remite la cuarta y última diferencia. En la planta *tmm* muchas células subsidiarías se dividen de suerte tal, que el plano de división corta el estoma vecino, lo que deriva en el desarrollo de meristemoides (y posteriormente estomas) en contacto con dichos estomas.

Estas cuatro alteraciones que exhibe la planta *tmm* permiten adjudicarle cuatro funciones a la proteína TMM: impide ésta que las células entre dos estomas o meristemoides operen como célula madre del meristemoide; interpone células entre meristemoides juntos; bloquea o reduce la formación prematura de estomas; por último, la proteína TMM orienta el plano de división de células subsidiarias que entran en la ruta de desarrollo estomático, y lo hace en el sentido de impedir que el meristemoide que surge de esta división establezca contacto con el estoma ya establecido.

Expresión espacial y temporal

El patrón de expresión espacial y temporal del gen *TMM* ayuda a entender la función de la proteína TMM en la generación de los estomas. La expresión del gen *TMM* se limita a la epidermis de la parte aérea de la planta, salvo la del meristemo apical. El gen se expresa en la hoja joven; no se detectan transcritos en hojas maduras.

El análisis de las hojas en proceso de desarrollo revela que el gen *TMM* se expresa en células en contacto con dos estomas o meristemoides. Se corrobora, pues, la tesis de que la proteína TMM impide que estas células operen como células madre del meristemoide. El gen *TMM* no se expresa en estomas. Sí lo hace en meristemoides y en la célula precursora del estoma; se entiende así la función de la proteína TMM en la regulación del mantenimiento de la proliferación de los meristemoides, que evita la producción prematura de estomas.

También hay transcritos de *TMM* en células en contacto con estomas o meristemoides. La proteína TMM podría participar allí en la orientación correcta de los planos de división e impedir su contacto con los estomas o meristemoides vecinos.

Receptores celulares

Del análisis de la secuencia del gen *TMM* se desprende que codifica una proteína homóloga a determinados receptores celulares. Todo receptor

consta de tres zonas o dominios: extracelular, transmembrana y citoplásmica. Expuesto a grandes rasgos, la región extracelular recibe información del exterior mediante su trabazón con un ligando. La penetración de los receptores citoplasma adentro permite que la información externa llegue al mismo núcleo. Se activa entonces una respuesta, que consiste en la transcripción de ciertos genes. Las proteínas codificadas por estos genes ejecutan las funciones.

La proteína TMM presenta un dominio transmembrana y una región extracelular. Las secuencias de esta última, ricas en el aminoácido leucina, facilitan la interacción entre proteínas; podría incluso permitir incluso que TMM reconociese un ligando.

Pero hay una dificultad: la proteína TMM carece de dominio citoplasmático. ¿Cómo logra, pues, introducir en el interior celular la información que recibe del exterior? Fred Sack observó que la estructura de la proteína TMM era muy similar a la de CLAVATA2 (CLV2), otro receptor celular sin dominio citoplasmático, que suspende las divisiones del meristemo apical. La proteína CLV2 interacciona con CLAVATA1 (CLV1), proteína que proporciona el dominio citoplasmático. De ese modo, el heterodímero CLV2/CLV1 reconoce al ligando y posibilita el flujo de información hacia el interior celular. Con ese ejemplo por delante, parece lógico suponer que la proteína TMM interacciona con otra que le aporte el dominio citoplasmático.

Aunque conocemos las células en las que se expresa el gen *TMM*, se ignora la ubicación de la proteína que codifica. A tenor de las peculiaridades de su naturaleza molecular, cabe sospechar que se encuentra anclada en la membrana.

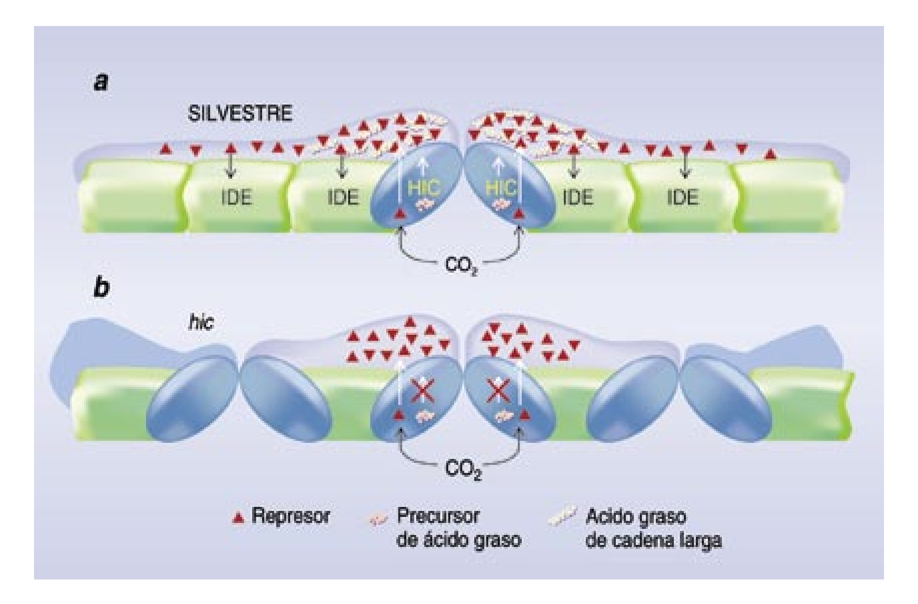
TMM y SDD1 comparten funciones

Las proteínas TMM y SDD1 comparten algunas funciones: reducen el número de células que se comportan como células madre del meristemoide, regulan la orientación del plano de división de células subsidiarias e inhiben la formación prematura de estomas.

Puesto que la proteína TMM carece de dominio citoplasmático, cabría esperar que interaccionase estructuralmente con otra proteína que aportase ese dominio intracelular necesario para permitir el flujo de información desde la superficie celular hasta el núcleo. Conocemos varios receptores con dominio citoplasmático, cuya función se ignora, que podrían interaccionar con la proteína TMM. Este hipotético heterodímero debería ser activado por un ligando, que podría ser una molécula procesada por la proteína SDD1. Así, SDD1 procesaría una molécula que daría lugar a un ligando que, al interaccionar con el heterodímero propuesto, desencadenaría una serie de eventos que culminarían con el desarrollo de las funciones compartidas por TMM y SDD1.

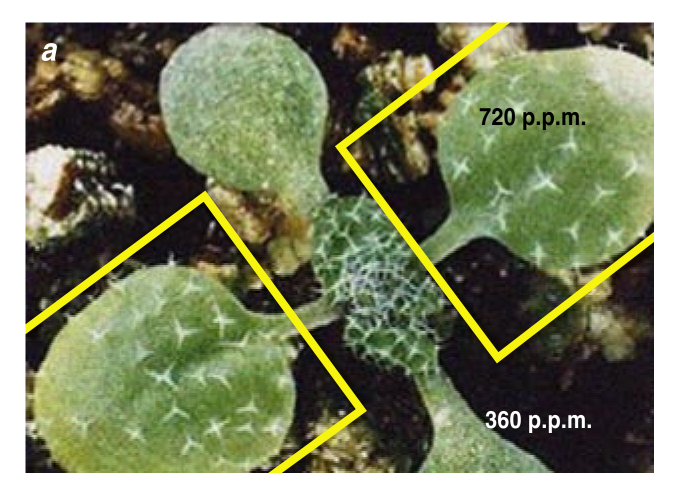
Semejante modelo nos recuerda los mecanismos moleculares que controlan las divisiones celulares en el meristemo apical. Aquí, un ligando denominado CLAVATA3 (CLV3) se une y activa al heterodímero CLV1/CLV2. La proteína CLV3 tiene una región que es reconocida por subtilasas, lo que sugiere que un homólogo a CLV3 podría también participar en el desarrollo estomático. Conviene no olvidar que mientras la activación de CLV1/CLV2 detiene las divisiones celulares en las células del meristemo apical, la activación de la proteína TMM promueve el efecto contrario en los meristemoides de la hoja y cotiledón.

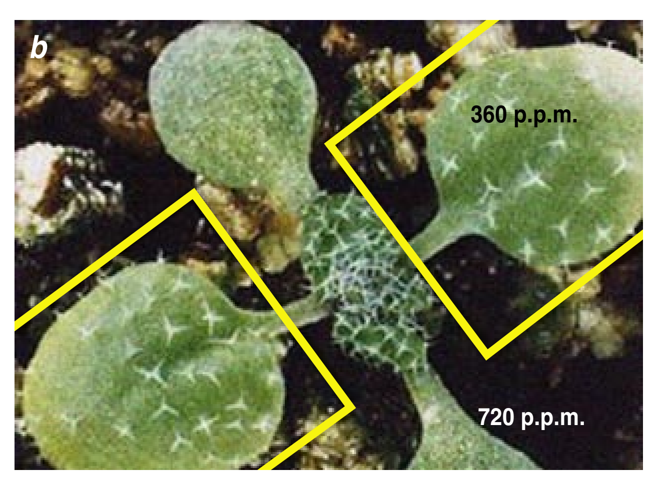
La comparación entre los mutantes *tmm* y *sdd1-1* arroja luz sobre la posible interacción entre la proteína TMM y un ligando que resultase del procesamiento llevado a cabo por SDD1 sobre una molécula aún sin identificar. Tal comparación entre mutantes nos indica también que la proteína TMM debe actuar con independencia de la proteína SDD1 en la regulación de procesos que sólo están afectados en el mutante *tmm* (por ejemplo, la ausencia de estomas en el hipocotilo en *tmm*). Si aceptamos el modelo propuesto en el hipocotilo, la proteína TMM no se activaría por un ligando que resultase del procesamiento de SDD1, sino por otros generados al margen de esa subtilasa.



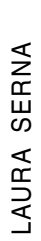
7. EL GEN *HIC* EVITA EL INCREMENTO DEL INDICE ESTOMATICO cuando la planta se encuentra bajo concentraciones elevadas de CO_2. El gen *HIC* (de "high carbon density") codifica un homólogo a 3-cetoacil CoA sintetasa, enzima implicada en la síntesis de ácidos grasos de cadena larga. En plantas silvestres, la proteína HIC promueve la síntesis de ácidos grasos de cadena larga. Los lípidos en cuestión se incorporan a la cutícula y facilitan la difusión de un factor inhibidor (que opera sólo a altos niveles de CO_2), cuya misión estriba en reprimir el destino estomático de las células (*a*). Las plantas con mutaciones en el gen *HIC* no sintetizan ácidos grasos de cadena larga, por lo que se dificulta o impide la difusión del factor inhibidor, permitiendo que un elevado número de células epidérmicas desarrollen estomas (*b*). (IDE, Inhibición del destino estomático.)

LAURA SERNA





8. LAS HOJAS MADURAS PERCIBEN LA CONCENTRACION ATMOSFERICA DE CO_2 y envían esta información a las jóvenes. Se comprobó a través de un ensayo harto sencillo. Se introdujeron hojas maduras en cubetas, sometido su interior a una concentración de CO_2 de 720 ppm; se analizó luego el índice estomático de las hojas jóvenes, que se desarrollaron en las cubetas a 360 ppm del mencionado gas, y se observó que el índice estomático de estas hojas jóvenes era inferior al de plantas cultivadas en la naturaleza a 360 ppm. Resultaba obvio que las hojas maduras informaban a las jóvenes de los altos niveles de CO_2, y éstas ajustan su índice estomático a tales niveles (*a*). Cuando se invirtieron las condiciones de cultivo, de forma que las hojas maduras se expusieron a 360 ppm y las jóvenes a 720 ppm, se observó que el índice estomático de las hojas jóvenes volvía a ajustarse a las condiciones de desarrollo de las hojas maduras: el índice de las hojas jóvenes fue similar al de plantas cultivadas a 360 ppm (*b*). En resumen: las hojas maduras perciben los niveles de CO_2 y mandan esta información a las hojas jóvenes, las cuales ajustan su desarrollo a partir de esta información.



HIC y el incremento del CO_2 atmosférico

En los años ochenta, F. Ian Woodward, de la Universidad de Cambridge, puso de manifiesto la relación existente entre el índice estomático y los niveles atmosféricos de CO_2. Analizando pliegos de herbario de diversas especies arbóreas, comprobó que el índice estomático de una especie dependía de la época en la que se había desarrollado. Los individuos más antiguos, que habían convivido con bajos niveles de CO_2 en la atmósfera, presentaban un índice estomático superior al de los individuos recolectados en épocas más recientes y, en consecuencia, sometidos a niveles superiores de este gas. No sólo se demostró que el CO_2 controlaba el índice estomático, sino también que, con los niveles actuales, se encontraba saturada la respuesta a este gas.

La disminución del índice estomático a medida que fueron aumentando los niveles de CO_2 en los últimos 200 años posibilitó un uso más eficiente del agua. Al incrementarse la concentración atmosférica de CO_2, aumentaba la velocidad de difusión de este gas hacia el interior de la planta; con ello, la disminución del índice estomático reducía la transpiración sin repercutir en la fijación de CO_2.

Arabidopsis thaliana no rebaja tampoco el índice estomático si se elevan los niveles de CO_2 atmosférico por encima de la concentración actual. Pero hace pocos años el grupo de Alistair M. Hetherington, de la Universidad de Lancaster, observó que el mutante *hic* incrementaba el índice estomático si se cultivaba bajo unas concentraciones de CO_2 que duplicasen los valores actuales. Con otras palabras, el producto codificado por el gen *HIC* evita el incremento del índice estomático en atmósferas enriquecidas en CO_2.

El gen *HIC*, cuya expresión se limita a células oclusivas, muestra una estrecha homología de secuencia con el gen *KSC1* de *A. thaliana*. El gen *KSC1* codifica una proteína cuya secuencia es homóloga a 3-cetoacil CoA sintetasa, enzima que participa en la síntesis de ácidos grasos de cadena larga; éstos forman parte de las ceras cuticulares que recubren la epidermis.

La versión mutante del gen *HIC* debe producir alteraciones en la composición de las ceras cuticulares, lo que provoca un aumento del índice estomático ante niveles elevados de CO_2. Puesto que el índice estomático del mutante *hic* es similar al de plantas silvestres cuando se cultivan bajo niveles actuales de CO_2, las mencionadas alteraciones cuticulares no deben condicionar el patrón actual de distribución de los estomas.

Queda mucho por conocer en torno a la relación entre el incremento del índice estomático de *hic* y las alteraciones en la composición de ceras cuticulares. Se presume que las alteraciones en cuestión podrían reducir el radio de difusión de algún factor inhibidor del desarrollo estomático, sintetizado en los estomas o en sus precursores.

Se sospecha que las células epidérmicas situadas fuera del radio de acción del factor inhibidor inician el desarrollo estomático. Y lo hacen a través de la producción de nuevo factor cuyo radio de difusión debe de ser notablemente menor que el implicado en las plantas silvestres. Esta merma en la difusión del factor que evita la formación de estomas, y que se debe a la presencia de una cutícula alterada, desencadena, así se cree, un mayor índice estomático en el mutante *hic*. La idea de "inhibición lateral" que subyace bajo este modelo fue adelantada por E. Bünning y H. Sagromsky hace más de medio siglo. Desde entonces no hemos avanzado un milímetro en el

Mutación	Fenotipo mutante	Producto génico
tmm	Estomas juntos Ausencia de estomas en el hipocotilo y tallo floral	Receptor sin dominio citoplásmico
flp	Parejas de estomas	*Sin identificar*
sdd1	Elevado índice estomático Algunos estomas juntos	Subtilasa
hic	Elevado índice estomático a altos niveles de CO_2	3-cetoacil CoA sintetasa

9. UN RECEPTOR CELULAR SIN DOMINIO CITOPLASMATICO y una proteína aún sin identificar (FLP) impiden, respectivamente, la formación de grupos de estomas adyacentes y parejas de éstos. Para formar estomas en el hipocotilo y tallo floral se requiere también la intervención del receptor. Una subtilasa y una 3-cetoacil CoA sintetasa impiden el incremento del índice estomático. La segunda enzima, que cataliza la formación de ácidos grasos de cadena larga de las ceras de la cutícula, interviene cuando las plantas se cultivan bajo niveles elevados de CO_2; por su parte, se exige la presencia de subtilasa para evitar la formación de estomas contiguos.

desentrañamiento de la naturaleza de dicho factor inhibidor.

En un sencillo experimento, el grupo de F. Ian Woodward, de la Universidad de Sheffield, introdujo hojas maduras de *A. thaliana* en cubetas y las sometió a altas concentraciones de CO_2 (720 ppm); dejaba las hojas jóvenes a concentraciones actuales (360 ppm). Cuando se analizó el patrón estomático de las hojas jóvenes enclaustradas en la cubeta se encontró un índice estomático muy bajo en comparación con el exhibido por plantas control, cultivadas en la naturaleza a 360 ppm. Las hojas maduras perciben los altos niveles de CO_2 y mandan esa información a las hojas jóvenes (que se desarrollaban a 360 ppm), las cuales responden ajustando su índice estomático como si se hubiesen desarrollado a 760 ppm de CO_2.

Cultivaron también plantas cuyas hojas maduras, encerradas en la cubeta, estuviesen expuestas a 360 ppm y las jóvenes a 760 ppm. El índice estomático de hojas jóvenes fue similar al de plantas control cultivadas en la naturaleza a 360 ppm. Resultaba, pues, evidente que las "señales" moduladoras del índice estomático viajan desde las hojas maduras hacia las jóvenes. Se ignora la naturaleza de estas señales.

La concentración atmosférica de CO_2 no constituye el único factor ambiental percibido por las hojas maduras. Estas son sensibles también a la intensidad lumínica y transmiten la información a las hojas en desarrollo, que ajustan en consonancia su índice estomático. Las hojas jóvenes de plantas cuyas hojas maduras se desarrollaron en sombra exhiben un índice estomático inferior al de hojas cultivadas bajo alta intensidad lumínica y, similar, al de plantas cultivadas en sombra.

La autora

Laura Serna Hidalgo es profesora titular en la facultad de medio ambiente de la Universidad de Castilla-La Mancha en Toledo. Se formó en la Universidad Autónoma de Madrid y en el Instituto John Innes de Norwich. Su investigación se ha centrado en el control genético-molecular del desarrollo estomático en *Arabidopsis thaliana*.

Bibliografía complementaria

BIOLOGÍA VEGETAL: PLANTAS Y CO_2, por Laura Serna y Carmen Fenoll, en *Investigación y Ciencia*, abril 2002.

REINFORCING THE IDEA OF SIGNALLING IN THE STOMATAL PATHWAY. L. Serna y C. Fenoll en *Trends in Genetics*, vol. 18, págs. 597-600; 2002.

THE ROLE OF STOMATA IN SENSING AND DRIVING ENVIRONMENTAL CHANGE. A. M. Hetherington y F. I. Woodward en *Nature*, vol. 424, págs. 901-908; 2003.

LAURA SERNA

Polarización del fondo cósmico de microondas

Se buscan los secretos de la dinámica del universo primitivo en el brillo ancestral de la gran explosión

Matthew Hedman

En el verano de 2002, un equipo de astrónomos, que trabajaba con un instrumento instalado en el polo Sur, el Interferómetro de Escala Angular en Grados (DASI), anunciaba el descubrimiento de que el rescoldo de la gran explosión, la radiación del fondo cósmico de microondas (FCM), está ligeramente polarizado; es decir, que los campos eléctricos de las microondas cósmicas presentan una orientación preferencial. En otras palabras, la señal procedente del espacio profundo tiene asociada una determinada dirección, como las direcciones de las señales de las estaciones de radio que afectan a la recepción por una antena que posea una orientación particular. Desde cinco años antes venía yo trabajando en la medición de esa esquiva señal.

Queda mucho por investigar antes de que la parte polarizada del FCM desvele todos sus secretos. La componente polarizada es, en el mejor de los casos, cien mil veces menor que la porción no polarizada del FCM, por lo que medirla resulta muy difícil y requiere paciencia y atención. No obstante, hay tanto que ganar, que varios equipos están empeñados en conocerla mejor.

Orígenes

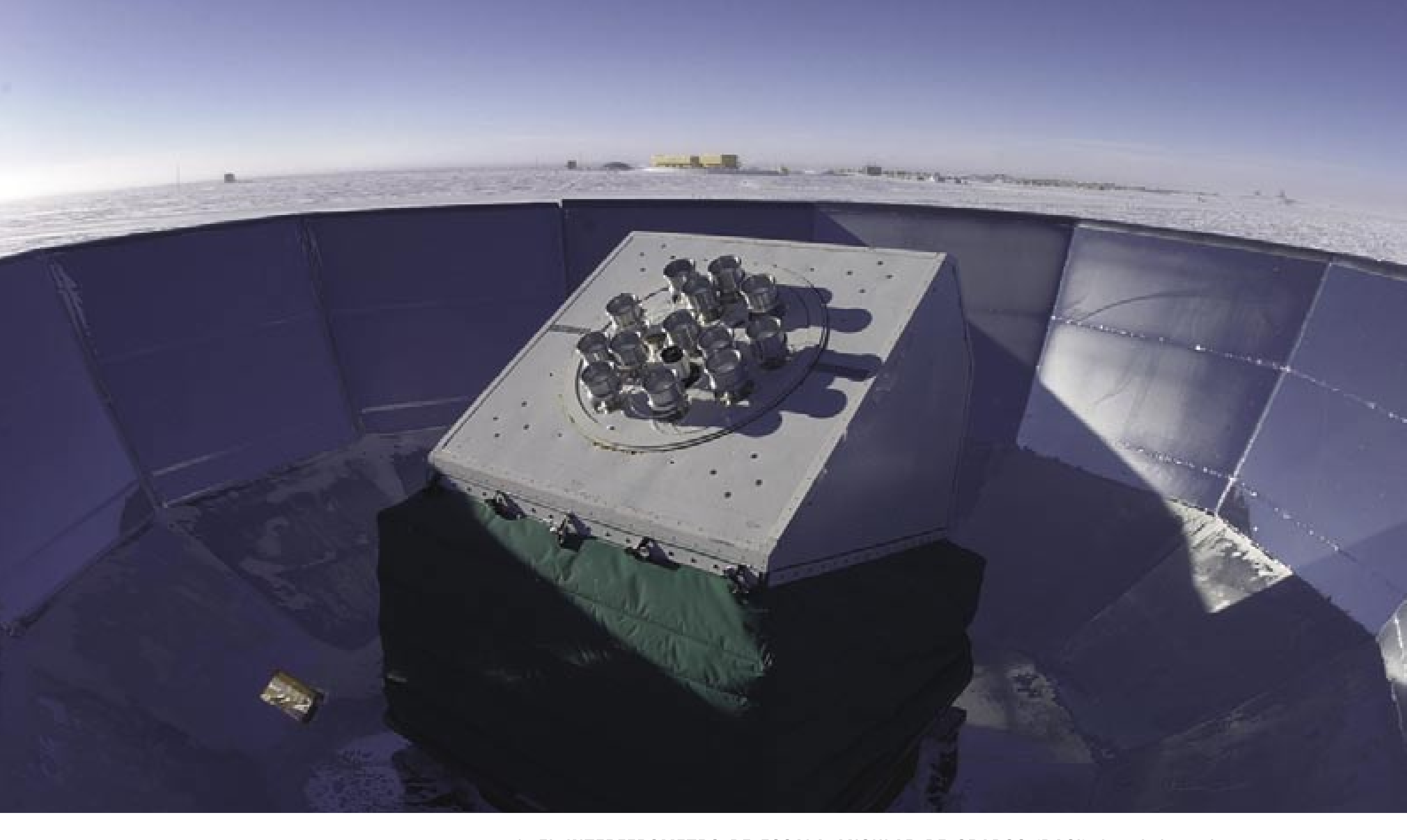
Durante los primeros cientos de miles de años tras la gran explosión, el universo contenía un plasma caliente, un mar gaseoso de partículas dotadas de carga. En la mezcla coexistían también partículas de luz, o fotones. Los fotones no llegaban muy lejos dentro del plasma primordial; los dispersaban los electrones, que, sometidos a un calor abrasador, no se ligaban a los protones. Esta dispersión fotónica hacía que el universo no fuese transparente a la luz.

Al irse expandiendo el universo, el plasma ocupó un volumen cada vez mayor y, por lo tanto, se enfrió. Cuando la temperatura del universo se desplomó hasta quedar en varios miles de kelvin, los protones y los electrones se recombinaron y formaron átomos de hidrógeno neutro; los fotones quedaron libres para viajar por el cosmos. Este “desacoplamiento” (de la materia y la radiación) ocurrió cuando el universo contaba apenas con una edad de 300.000 años.

Ahora, unos 13.700 millones de años más tarde, esos fotones continúan viajando a través del universo. Sin embargo, su longitud de onda ha seguido aumentado a medida que se expandía el universo: hoy día, el cosmos está sumergido en un débil baño de fotones de microondas, la radiación del FCM. El FCM está presente por todo el cielo, pero no se puede sentir ni ver porque es muy débil, casi mil millones de veces más tenue que las microondas de un horno. Pese a su sutileza, estas microondas ancestrales contienen información crucial sobre el universo primitivo.

Por fortuna, existen dispositivos especializados capaces de rastrear ese fondo de microondas. El FCM aparece sin cambios, isotrópico, allá donde se mire. Pero los instrumentos más sensibles, como DASI, pueden medir diferencias muy pequeñas, o anisotropías, tanto en el brillo como en la polarización de la radiación procedente de distintos puntos del cielo (*véase la figura 1*). Que existan estas anisotropías revela que el plasma del universo primitivo no era perfectamente uniforme.

Las anisotropías del brillo y de la polarización fueron causadas en el plasma primordial por fenómenos diferentes, proporcionan, pues, informaciones distintas sobre la naturaleza del universo primitivo. Las variaciones de brillo observadas en el FCM reflejan las diferencias de densidad en el plasma primordial: el plasma comprimido tiene una mayor temperatura y brilla con mayor intensidad. Las mediciones de las anisotropías del brillo,



1. EL INTERFEROMETRO DE ESCALA ANGULAR DE GRADOS (DASI), instalado en la Antártida, fue el primer instrumento que detectó la polarización de la radiación del fondo cósmico de microondas; fue en 2002. Muchos otros instrumentos intentan ahora refinar las primeras mediciones. Se espera que esta información aporte luz sobre propiedades fundamentales del universo primitivo, como la dinámica y la composición del plasma primordial y la presencia de ondas gravitatorias. Los edificios principales de la estación Amundsen-Scott del polo Sur se aprecian en el horizonte.

CORTESIA DE JOHN KOVAC/DASI/*American Scientist*

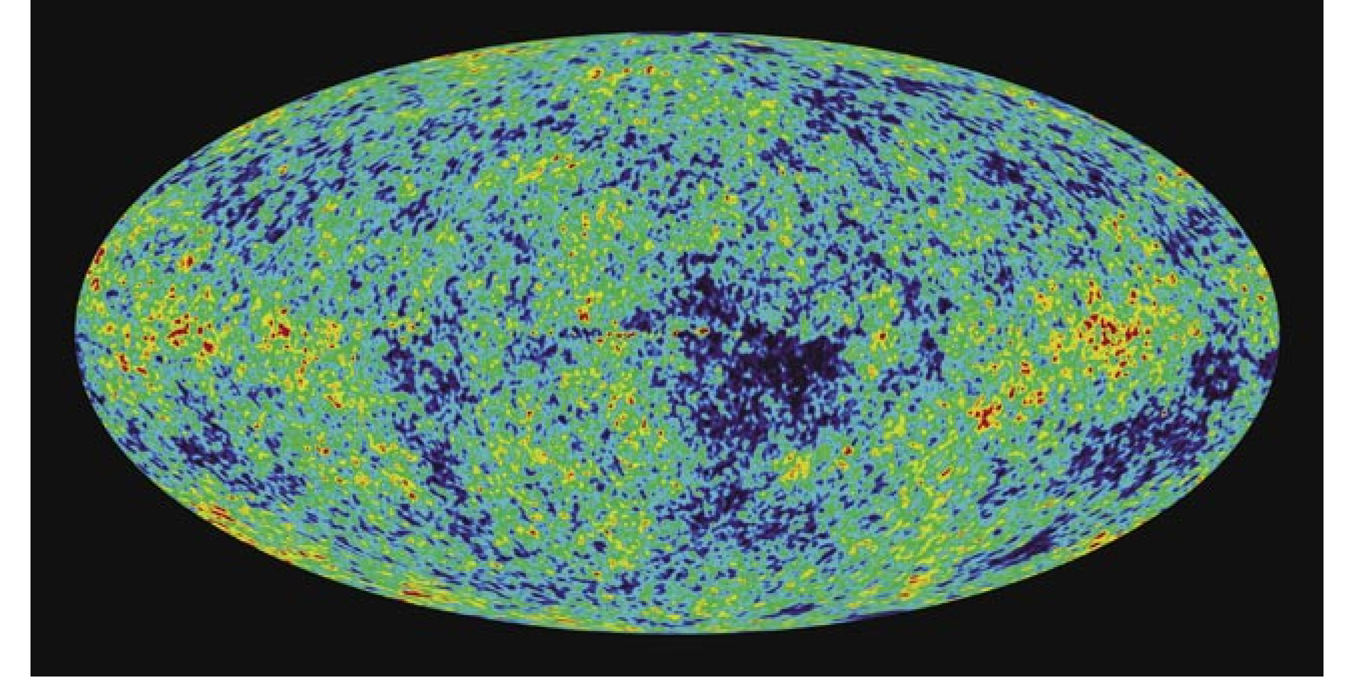
como las realizadas en 2003 por la sonda Wilkinson para el Estudio de la Anisotropía de las Microondas (WMAP), aportan información sobre la estructura y la composición del universo primitivo (*véase la figura 2*). Por otra parte, la anisotropía de la polarización del FCM podría desvelar la dinámica del universo primitivo: el movimiento del material en el plasma primordial y el número de ondas gravitatorias.

La polarización

La polarización del FCM se originó en el plasma primordial como consecuencia de la interacción entre los fotones y los electrones libres, fenómeno llamado "dispersión Thomson" (*véase la figura 5*). Cuando la luz (que, debe recordarse, es una onda electromagnética) incide sobre un electrón, el campo eléctrico oscilante de la onda hace que la partícula dotada de carga vibre en el plano perpendicular a la dirección del movimiento del fotón. A su vez, el electrón vibrante genera una nueva onda electromagnética: emite luz. Esta luz está polarizada a lo largo de la dirección de la aceleración del electrón y, en consecuencia, se hallará polarizada en el plano de su movimiento. Por tanto, aun cuando la luz incidente no esté polarizada, la luz dispersada podrá tener una componente polarizada.

Sobre los electrones de un plasma inciden fotones desde todas las direcciones. Si la luz incidente (no polarizada) brilla por igual en cada una de ellas, la partícula se verá empujada con idéntica intensidad en todos los ejes posibles. Puesto que el electrón se movería de la misma forma por todos los planos, la luz dispersada no presentaría ninguna polarización promedio. Sin embargo, si la luz incidente brilla más a lo largo de un eje que de otro, el electrón se desplazará más en un plano que en otro, y la radiación emitida estará linealmente polarizada (*véase la figura 6*). De la luz incidente cuyo brillo varía de esta manera se dice que tiene un momento cuadrupolar. Por lo tanto, un momento cuadrupolar en la luz incidente genera una componente polarizada en la radiación dispersada.

Existen dos mecanismos capaces de provocar momentos cuadrupolares locales: los flujos masivos de plasma y las ondas gravitatorias. Para representar el proceso a través del cual el movimiento masivo del plasma crea una señal polarizada, imaginemos que fluye radialmente hacia algún punto y que en ese flujo hay un gradiente de velocidad (*véase la figura 7*). Si cambiamos nuestro sistema de referencia por el de un electrón aislado, nos parecerá que el plasma entorno se mueve hacia nosotros en todas las direcciones. Puesto que el plasma se desplaza a altas velocidades, aparecen efectos relativistas: la porción de plasma que avance hacia nosotros nos parecerá más brillante que una porción inmóvil. Cuanto más rápido se mueva el plasma, más brillante lo veremos. Puesto que el material que se desplaza hacia nosotros por delante y por detrás se aproxima a una velocidad mayor que el mate-



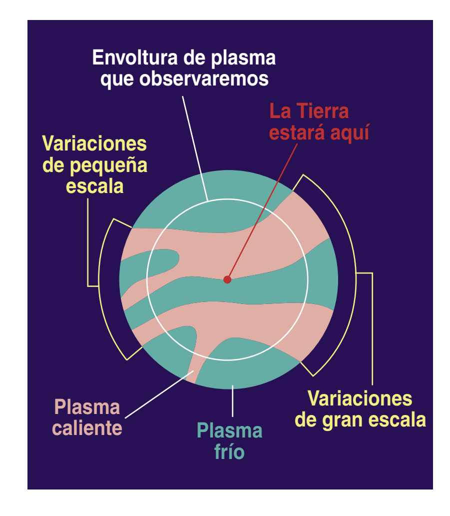
2. EL MAPA DEL FIRMAMENTO levantado por la sonda Wilkinson para el Estudio de la Anisotropía de las Microondas (WMAP) pone de manifiesto las variaciones de brillo (o temperatura) de la radiación del fondo cósmico de microondas (*rojo, más caliente; azul, más frío*). El brillo cambia en una parte en diez mil. Las diferencias de polarización son de un orden de magnitud menos; cuesta más medirlas. La radiación del fondo cósmico apareció 300.000 años después de la gran explosión, cuando el universo se hizo transparente a la luz. Las variaciones de brillo y polarización de esta radiación guardan los secretos de la densidad y del comportamiento de la materia durante la infancia del universo. La sonda WMAP ya ha facilitado datos de la polarización; pronto se anunciarán mediciones más precisas.

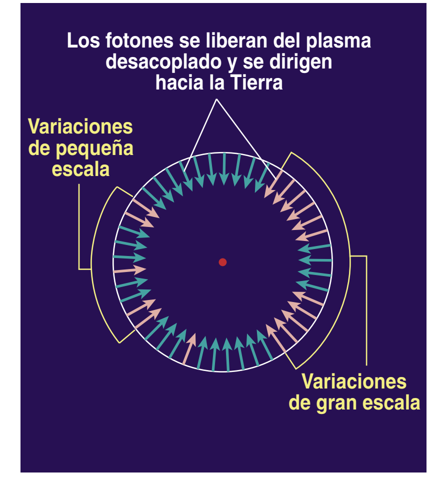
rial de los lados, habrá un momento cuadrupolar en la intensidad de la radiación incidente sobre el electrón. En consecuencia, la luz dispersada por el electrón tendrá una componente polarizada. De esta forma, los cambios de la velocidad del plasma conducen a emisiones polarizadas.

Los movimientos masivos de plasma pueden estudiarse en un laboratorio. Las ondas gravitatorias constituyen un mecanismo más singular de generar momentos cuadrupolares. Consisten en distorsiones que se propagan libremente por el espacio y el tiempo, predichas por la Teoría General de la Relatividad de Einstein. Cuando pasa una onda gravitatoria, el espacio se estira y se achata alternativamente a lo largo de dos ejes ortogonales (*véase la figura 8*). Los fotones que se propagaran por una dirección vertical se aproximarían entre sí, mientras que los que se propagasen horizontalmente se separarían. En consecuencia, la luz que se desplaza en las dos direcciones ortogonales presentará brillos diferentes y un momento cuadrupolar. Cuando esta luz incida sobre un electrón, se emitirá una onda de luz polarizada.

Los flujos frente a las ondas

El movimiento masivo del material en el universo primitivo guardó estrecha relación con las anisotropías de densidad del plasma primordial por la sencilla razón de que el modo en que se desplaza el material determina su destino. En cambio, la presencia o ausencia de ondas gravitatorias en el universo primitivo depende de unos sucesos de los que se sabe poco, acontecidos durante una pequeña fracción de nanosegundo tras la gran explosión. Por tanto, una de las señales polarizadas (la procedente de los flujos de plasma) debe ser compatible con el brillo observado



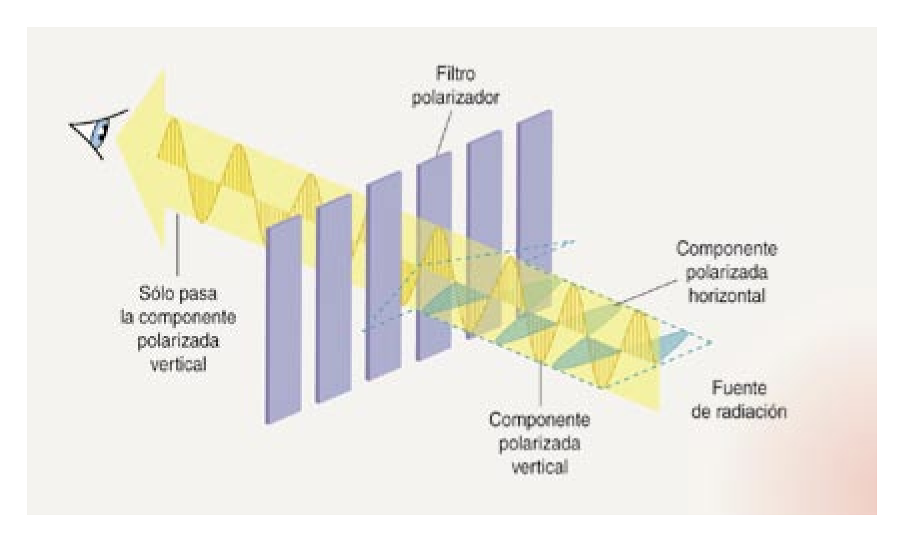


3. LAS ALTERACIONES DEL PLASMA PRIMORDIAL (*izquierda*) imprimieron variaciones en la radiación liberada durante el desacoplamiento, cuando el universo se hizo transparente. Los fotones de la radiación que detectamos se han estado dirigiendo hacia la Tierra desde el desacoplamiento, de ahí que parezca que se originaron en una envoltura esférica centrada en la Tierra (*derecha*). Las estructuras y los rasgos de diferentes escalas de longitud del universo primitivo se corresponden con distintas escalas angulares en el cielo.

NASA/WMAP SCIENCE TEAM (*arriba*); BARBARA AULICINO (*abajo*)/*American Scientist*

(que refleja las variaciones de densidad), mientras que la otra señal (la de las ondas gravitatorias) debe todavía medirse, para comprobar siquiera que existe en realidad. Pero podemos estudiar las dos señales por separado porque los flujos masivos y las ondas de gravedad producen en el cielo luz polarizada con características diferentes.

En principio, podrían observarse varios patrones diferentes de señales polarizadas. Los patrones que no cambian en una reflexión especular se llaman modos E, mientras que los que sí cambian se denominan modos B (*véase la figura 9*). Los flujos masivos de plasma no pueden generar los modos B; su generación requiere complejos flujos circulares que no pudo haber en el plasma primordial. Por el contrario, las ondas gravitatorias crean modelos E y B con pareja eficiencia. De ahí que quepa distinguir entre las dos fuentes mediante la cuantificación de las señales de los modos E y B. Puesto que la polarización debida a los flujos masivos es más intensa que la debida a las ondas gravitatorias, los patrones de modo E miden eficazmente el flujo y el reflujo del plasma primordial, mientras que los patrones de modo B informan sobre el estiramiento y achatamiento del espacio-tiempo.

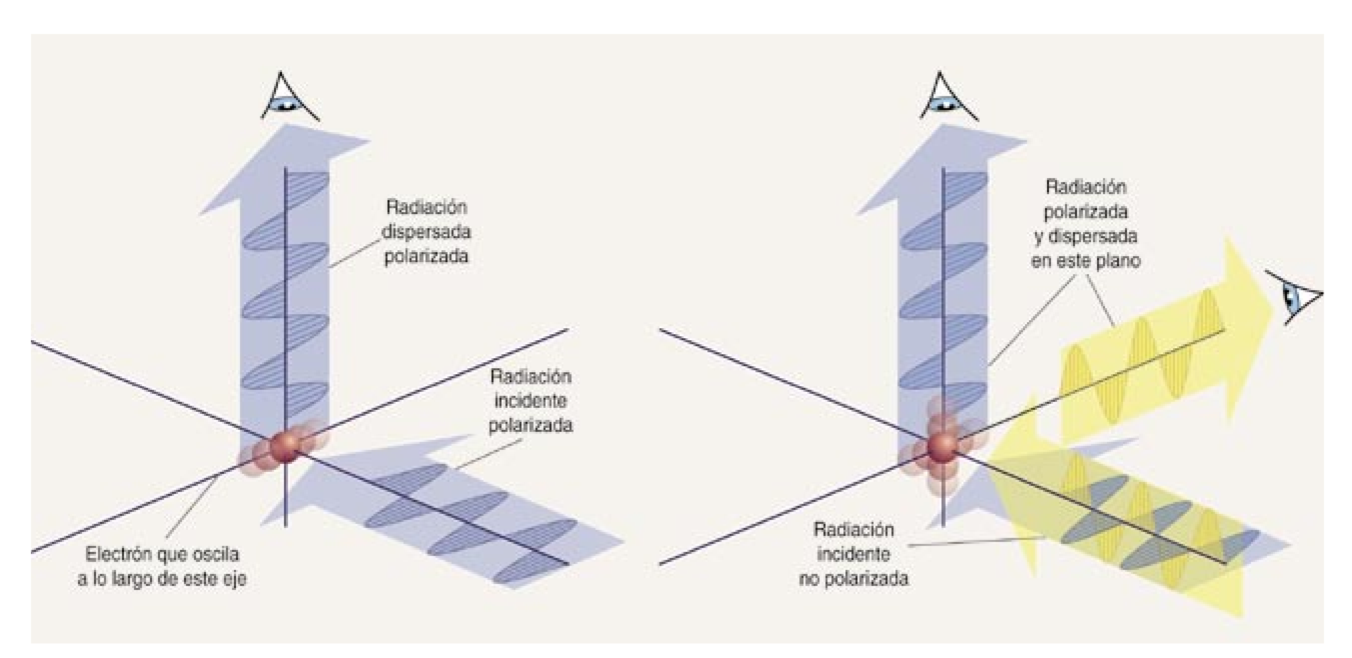


4. LA RADIACION ELECTROMAGNETICA NO POLARIZADA consiste en la oscilación de campos eléctricos perpendiculares a la dirección de propagación, pero, por lo demás, con una orientación aleatoria. El paso de esta radiación a través de un filtro especial polariza la luz, de forma que los campos eléctricos se orientan en una única dirección preferencial.

En la práctica, no resulta tan sencillo separar las señales debidas a los flujos masivos de las señales causadas por las ondas gravitatorias. Los fotones han estado viajando por el universo durante 13.700 millones de años; han pasado por distintos avatares, que podrían haber contaminado los datos. No sabemos si tales fenómenos impedirán la detección de las ondas de gravedad.

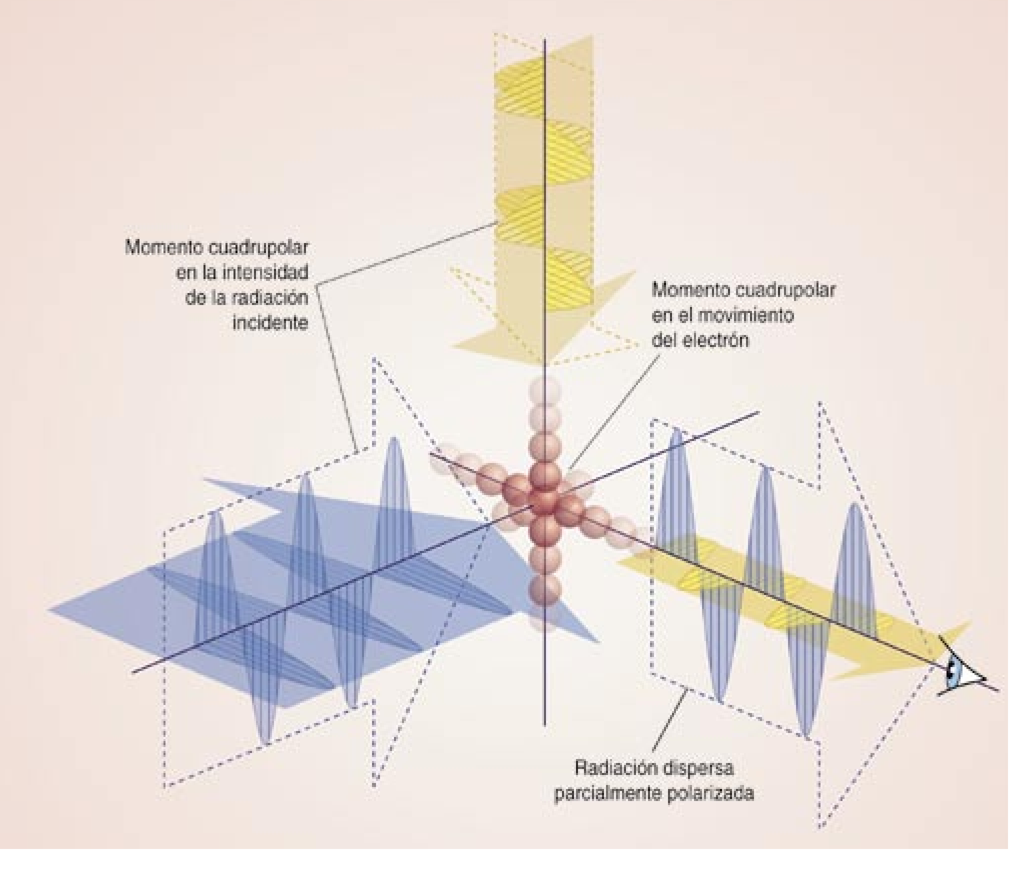
Extracción de la información

El fondo cósmico de microondas es una poderosa herramienta para el estudio del universo primitivo no sólo porque las variaciones en el brillo y en la polarización guarden una relación directa con la densidad, el movimiento y el contenido de ondas de gravedad del plasma primordial, sino también porque las propiedades y la dinámica del universo a la



BARBARA AULICINO/*American Scientist*

5. LA DISPERSION THOMSON entre los electrones libres y los fotones generó, en el plasma primordial, radiación polarizada. Cuando la radiación incide sobre un electrón (*bola roja*), la onda electromagnética provoca la oscilación del electrón en un plano perpendicular a la dirección del fotón incidente. El electrón oscilante emitirá luz polarizada en el plano en que se mueve. De este modo se crea radiación polarizada, se halle polarizada la radiación incidente (*derecha*) o no (*izquierda*).



6. DE UNA RADIACION INCIDENTE que brille más a lo largo de un eje (*izquierda*) que a lo largo de otro (*arriba*) se dice que presenta un momento cuadrupolar. Cuando esta luz incide sobre un electrón (*bola roja*), la partícula dotada de carga oscila más en un plano que en el otro y, por tanto, dispersa una radiación parcialmente polarizada. Los momentos cuadrupolares de la radiación del plasma primordial produjeron radiación polarizada (*véanse las figuras 7 y 8*).

edad de 300.000 años fueron menos complejas que las de otros sistemas astrofísicos; por ejemplo, menos que las de una galaxia espiral. Esta simplicidad se aprecia en el mapa de las anisotropías de brillo del FCM producido por WMAP, que muestra manchas calientes y frías de tamaños y formas diversos, pero donde no existe ninguna estructura clara, como arcos o brazos espirales.

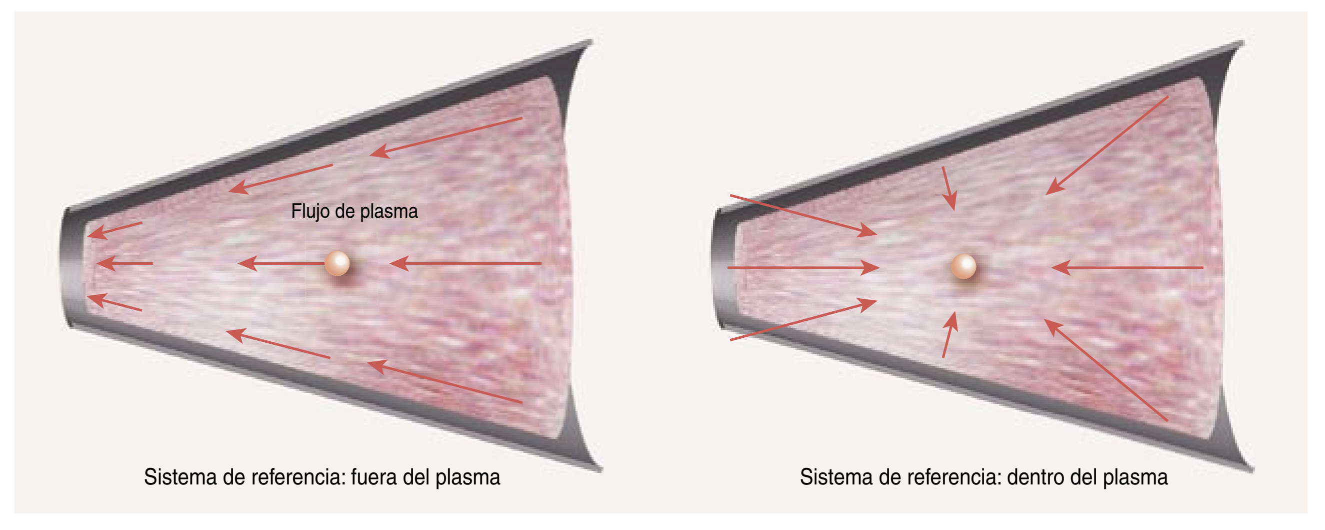
No cuesta demasiado cuantificar y analizar las anisotropías porque, pese a que existen manchas calientes y frías en un amplio rango de escalas, las amplitudes de las variaciones son pequeñas. El brillo cambia en una parte en diez mil; la polarización, en un orden de magnitud menos. Lo que quiere decir que las variaciones en la densidad y el movimiento del plasma fueron, en ambos casos, mínimas. La debilidad de las variaciones dificulta su detección, pero permite simplificar las ecuaciones que describen el movimiento del plasma primordial. En concreto, las variaciones en una escala no afectaron a las otras escalas. Por tanto, podemos considerar las variaciones en una escala determinada de manera independiente, como si las otras variaciones no hubieran ocurrido.

Las anisotropías del FCM acostumbran representarse por medio de un espectro de potencias, una gráfica que muestra la amplitud de las variaciones en función de la escala (*véase la figura 10*). Las predicciones de los modelos cosmológicos y los datos procedentes de los experimentos revelan varias estructuras, cada una de las cuales fue causada por procesos físicos distintos. Para hacernos una idea de tales procesos, imaginemos una variación en una escala única, en la cual la densidad del plasma primordial cambie con la posición de manera sinusoidal. La amplitud de la fluctuación —la diferencia de densidad entre las regiones más y menos densas— cambiará con el tiempo bajo la influencia de dos fuerzas: la presión y la gravedad. La gravedad tiende a arrastrar el material hacia las regiones más densas, aumentando la magnitud de la variación de densidad. La presión actúa en sentido opuesto, llevando el material fuera de las regiones densas y reduciendo la diferencia de densidad.

Los efectos de estas dos fuerzas dependerán notablemente de la escala de la fluctuación, ya que el universo en cualquier instante de su historia presenta una longitud intrínseca llamada horizonte, la distancia que la luz ha viajado en el tiempo desde la gran explosión. Si la longitud de onda de la fluctuación es mucho mayor que el horizonte, a cualquier electrón del plasma el universo le parecerá prácticamente homogéneo, y el plasma no tenderá a moverse. Pero si la longitud de onda de la fluctuación es mucho menor que el horizonte, los electrones "verán" regiones de distinta densidad; quedarán, pues, sujetos a las fuerzas que los empujarán hacia las regiones más densas (gravedad) o hacia las menos densas (presión). Por tanto, las variaciones de escala mayores que el horizonte no cambiarán apenas con el tiempo, mientras que las variaciones menores evolucionarán a medida que el plasma se mueva en respuesta a las fuerzas de gravedad y presión.

El horizonte crece con la expansión del universo; en el momento del desacoplamiento —cuando los fotones del FCM se liberaron del plasma primordial— el universo era más pequeño que ahora. Por tanto, el FCM contiene información sobre las variaciones mayores y menores que el horizonte. Puesto que las variaciones mayores apenas han cambiado con respecto a su estado inicial, revisten particular interés en la investigación de las propiedades del universo primitivo. Sin duda, la polarización debida a las ondas de gravedad es más detectable a escalas grandes. Sin embargo, puesto que el plasma apenas se movía a dichas escalas, la polarización debida a los flujos masivos es muy pequeña.

Las variaciones a escalas más cortas que la escala del horizonte en el desacoplamiento cambiaron su estado inicial cuando el horizonte creció más que la longitud de onda de la fluctuación. En este momento, las regiones de densidad distinta se hallaban en contacto, y el plasma se movía en respuesta a la gravedad y a la presión antes de que los fotones se desacoplaran. Estas escalas proporcionan información sobre las propiedades dinámicas del plasma,

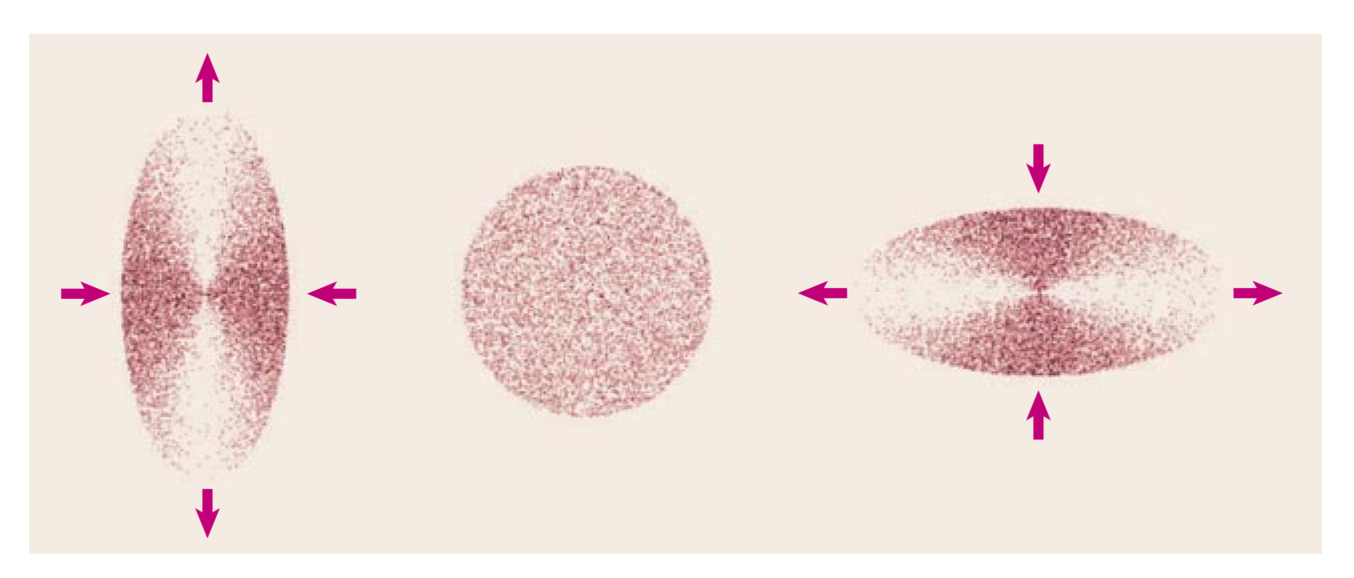


7. LAS DIFERENTES VELOCIDADES DEL FLUJO DEL PLASMA PRIMORDIAL (*flechas rojas*) actuaron como polarizadores de la radiación del fondo cósmico. Imaginemos un plasma que fluyera a través de un embudo y fuera frenándose a medida que se acerca a su destino (*izquierda*). Un electrón del interior del plasma "ve" que el plasma que le rodea se desplaza hacia él a velocidades diferentes: más rápido desde la izquierda y la derecha, más despacio desde arriba y abajo; es decir, las velocidades relativas tienen un momento cuadrupolar (*derecha*). Puesto que el plasma primordial se movía a velocidades altas, aparecen ciertos fenómenos relativistas: cuanto más rápido se aproxime el plasma, más brillante parecerá. En consecuencia, existe un momento cuadrupolar en la intensidad de la radiación que incide sobre el electrón; la radiación dispersada por la partícula cargada presentará una componente polarizada (*véase la figura 6*).

tales como la densidad de masa y la velocidad del sonido, que dependen, en buena medida, de la composición del universo primitivo.

La pugna entre las fuerzas de gravedad y la presión provoca la oscilación del plasma hacia fuera y hacia el interior de las regiones densas. Estas oscilaciones modifican las variaciones de brillo y generan una considerable polarización por medio de los movimientos masivos del plasma; en el espectro de potencias aparece una serie de picos y valles. Hay una relación simple y directa entre las variaciones de la velocidad y la densidad de un plasma oscilante, análoga a la relación entre la posición y la velocidad de una masa en un resorte. En consecuencia, a esas escalas las variaciones de la polarización y del brillo del FCM se encuentran estrechamente acopladas.

Las variaciones del FCM experimentaron más cambios durante el desacoplamiento y posteriormente al mismo; no se trató de un proceso instantáneo. Mientras se producía, los fotones viajaron distancias finitas entre dispersiones, y por tanto cance-



BARBARA AULICINO/*American Scientist*

8. LAS ONDAS DE GRAVEDAD del universo primitivo debieron de estirar y aplanar el plasma primordial a lo largo de dos ejes ortogonales. Cuando la forma de una región se distorsiona, la densidad y las longitudes de onda de los fotones que se desplazan a lo largo de los ejes se modifican también. Esta distorsión pudo producir un momento cuadrupolar en el brillo (*sombreado*) de la radiación del plasma y polarizar, pues, la radiación del fondo cósmico (*véase la figura 6*). No se han detectado ondas gravitatorias en la señal polarizada.

laron cualquier variación acontecida a menor escala. Tras el desacoplamiento, algunos fotones fueron dispersados por el plasma tenue producido por las estrellas y otros objetos luminosos, y otros se desviaron al pasar cerca de objetos de gran masa. Estos fenómenos alteraron de forma particular las señales de la polarización, a gran y a pequeña escala, de ahí que las observaciones del FCM perfilen ciertas características del universo tras el desacoplamiento.

Aunque la física que determina las estructuras y las propiedades del plasma primordial depende de la escala de la longitud de las variaciones, éstas se miden en la práctica por su escala angular sobre el cielo. Desde el desacoplamiento, los fotones se han venido dirigiendo hacia nosotros; parecen, pues, originarse en una envoltura esférica centrada en la Tierra (*véase la figura 3*). Las escalas angulares del cielo, pues, son esencialmente proporcionales a las escalas de longitud del universo temprano. Si el universo no estuviera en expansión y se atuviera a una simple geometría euclídea, la constante de proporcionalidad vendría fijada por el radio de la esfera. Sin embargo, el universo se ha expandido desde que se liberaron los fotones, y la geometría del universo podría no ser exactamente euclidiana. En consecuencia, la escala angular de los rasgos en el FCM depende también de la geometría y de la historia de la expansión del universo.

A pesar de que WMAP y otros experimentos observan ahora y miden muchos rasgos del espectro de potencias de las anisotropías del brillo, sólo se acaba de empezar a abordar la polarización del FCM. Los datos polarimétricos carecen de la precisión suficiente para mostrar con claridad los patrones predichos o demostrar con contundencia que los datos de brillo concuerdan con la polarización esperada. Es más, ni siquiera se ha detectado la esquiva señal de las ondas de gravedad.

9. DOS PATRONES DE SEÑALES POLARIZADAS puede haber en el fondo cósmico de microondas. El patrón de modos E presenta simetría especular, tal y como se aprecia en las reflexiones de abajo, mientras que los modos B cambian cuando se reflejan en un espejo. Los flujos masivos del plasma primordial generaron sólo modos E; las ondas de gravedad habrían producido los dos patrones. Cada barra representa la señal polarizada en un punto del cielo. La longitud de la barra corresponde al tamaño de la señal y su orientación indica la dirección de polarización.

BARBARA AULICINO/*American Scientist*

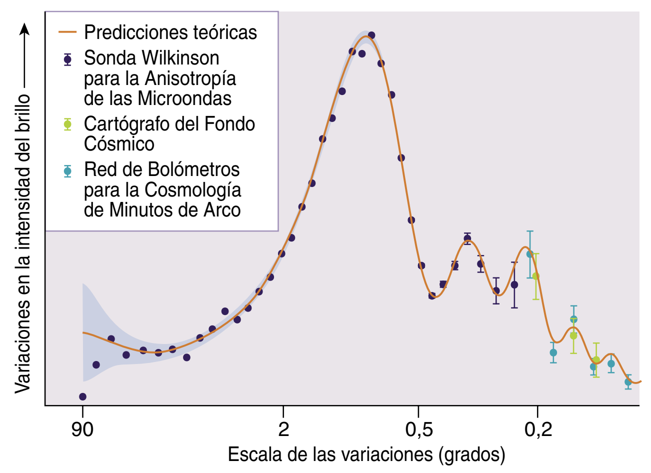
Medición de la polarización

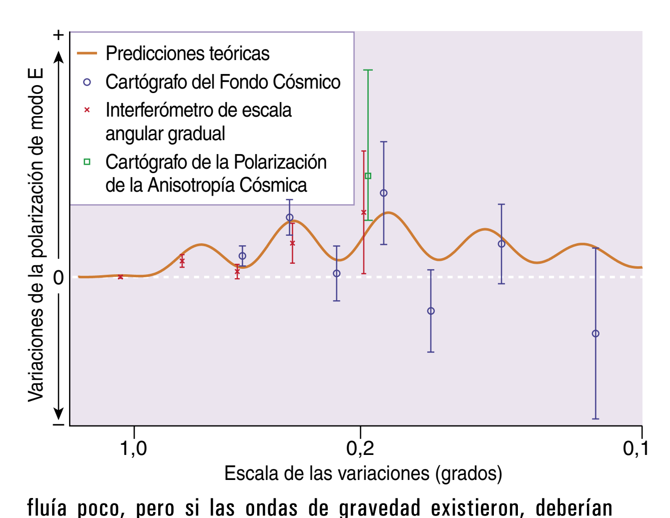
Se emplean varios procedimientos para extraer la débil señal de la polarización de la más intensa radiación no polarizada. Cada método presenta sus propios puntos fuertes y sus propias dificultades, pero todos comparten ciertas características básicas.

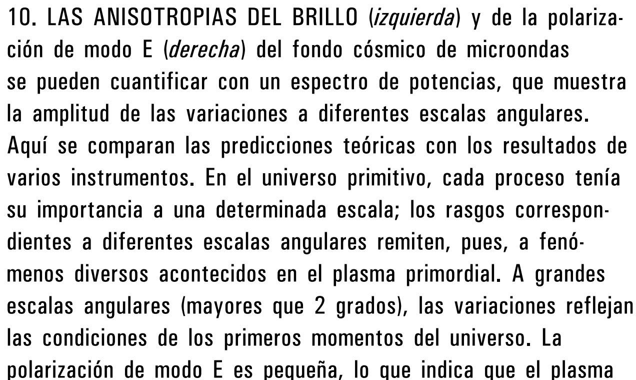
Todas las técnicas miden la diferencia en la intensidad del campo eléctrico a lo largo de dos ejes ortogonales. Las medidas diferenciales son comunes en polarimetría, y particularmente útiles en este contexto porque la resta de dos señales ortogonales cancela, en principio, la componente no polarizada. Sin embargo, puesto que la señal polarizada es muy pequeña, no podemos estar seguros de que la diferencia medida con el instrumento no venga causada por alguna asimetría del equipo. La rotación periódica del equipo permitiría eliminar de la señal real del cielo la contribución instrumental, pero en la práctica la rotación completa del instrumento es complicada, por lo que se emplean técnicas inteligentes para modular la radiación polarizada entrante y separar la señal real de los artefactos instrumentales.

Hay que tener además mucha paciencia, porque la señal es demasiado pequeña para medirla con rapidez. Sólo se puede recoger un número finito de fotones por segundo; la señal está con frecuencia dominada por fluctuaciones aleatorias. Por tanto, se debe repetir la medición durante muchos segundos para que las variaciones aleatorias se anulen y quede sólo la señal real de la polarización. Incluso con los mejores instrumentos se requieren horas para detectar la señal dominante procedente del movimiento masivo del plasma primordial. Caracterizar polarización y detectar las ondas gravitatorias primordiales requieren años de observación.

Varios equipos de investigación construyen hoy grandes redes de polarímetros con el fin de acelerar las observaciones. Puesto que cien polarímetros pueden ver en un día lo que un detector recogería en cien días, estas redes se convertirán en







10. LAS ANISOTROPIAS DEL BRILLO (*izquierda*) y de la polarización de modo E (*derecha*) del fondo cósmico de microondas se pueden cuantificar con un espectro de potencias, que muestra la amplitud de las variaciones a diferentes escalas angulares. Aquí se comparan las predicciones teóricas con los resultados de varios instrumentos. En el universo primitivo, cada proceso tenía su importancia a una determinada escala; los rasgos correspondientes a diferentes escalas angulares remiten, pues, a fenómenos diversos acontecidos en el plasma primordial. A grandes escalas angulares (mayores que 2 grados), las variaciones reflejan las condiciones de los primeros momentos del universo. La polarización de modo E es pequeña, lo que indica que el plasma fluía poco, pero si las ondas de gravedad existieron, deberían manifestarse a esta escala. A escalas intermedias (de 2 grados a 0,2 grados), una serie de picos y valles reflejan las oscilaciones del plasma primordial. Los picos de las variaciones de brillo se identifican con grandes variaciones de densidad en el momento del desacoplamiento, mientras que los picos en la polarización indican que el material se desplazaba rápidamente. Las variaciones de las escalas angulares más pequeñas (menos de 0,2 grados) disminuyen porque durante el desacoplamiento los fotones recorrieron distancias finitas entre una dispersión y la siguiente, borrando las variaciones de pequeña escala. Las dos gráficas se han realizado a distinta escala.

poderosas herramientas para el estudio de la polarización primordial en cuanto comiencen a funcionar a lo largo de los próximos años.

El fondo cósmico de microondas no es la única fuente de microondas polarizadas. Los electrones y el polvo del interior de nuestra galaxia y de los objetos extragalácticos polarizan también la radiación a las longitudes de onda del FCM. Aunque estas señales polarizadas pudieran ser débiles, no está claro si deben despreciarse, en particular cuando se trata de detectar la tenue señal de las ondas gravitatorias. Afortunadamente, los espectros de frecuencia de estas otras fuentes difieren del espectro del FCM; por eso, se está planeando medir la polarización cosmológica en varias longitudes de onda. Estas observaciones deberían identificar dicho ruido y aislarlo de las señales de origen cosmológico.

Queda mucho camino por recorrer en el estudio de la polarización del FCM. Aun así, se ha progresado bastante. En septiembre de 2004, varios grupos experimentales —los de DASI, el Cartógrafo de la Polarización de la Anisotropía Cósmica (CAPMAP) y el Creador de Imágenes del Fondo Cósmico (CBI)— hicieron públicas las nuevas medidas de la polarización del FCM. Los científicos del WMAP anunciarán pronto sus resultados. Durante los últimos meses, varios grandes proyectos nuevos, como el Experimento Creador de Imágenes Q/U (QUIET) y QUEST de DASI (QuaD), han incrementado sus esfuerzos. Estos y otros experimentos proporcionarán nuevos resultados, interesantes y quizá sorprendentes, sobre la dinámica del universo primitivo.

El autor

Matthew Hedman es investigador asociado del departamento de astronomía de la Universidad Cornell. Participó en la detección de la polarización del fondo cósmico de microondas en sus años de doctorando de la Universidad de Princeton y, luego, siendo ya investigador del Centro de Física Cosmológica (hoy Instituto Kavli de Física Cosmológica) de la Universidad de Chicago. Actualmente se ocupa del análisis de los datos enviados por la nave Cassini desde Saturno.

Bibliografía complementaria

FIRST-YEAR WILKINSON MICROWAVE ANISOTROPY PROBE (WMAP) OBSERVATIONS: PRELIMINARY MAPS AND BASIC RESULTS. C. L. Bennett et al. en *The Astrophysical Journal Supplement Series*, vol. 148, págs. 1-27; 2003.

POLARIZATION OBSERVATIONS WITH THE COSMIC BACKGROUND IMAGER. A. C. S. Redhead et al. en *Science*, vol. 306, págs. 836-844; 2004.

FIRST MEASUREMENTS OF THE POLARIZATION OF THE COSMIC MICRO-WAVE BACKGROUND AT SMALL ANGULAR SCALES FROM CAPMAP. D. Barkats et al. en *Astrophysical Journal Letters*, vol. 619, pág. L127; 2005.

DASI THREE-YEAR COSMIC MICROWAVE BACKGROUND POLARIZATION RESULTS. E. M. Leitch, J. M. Kovac, N. W. Halverson, J. E. Carlstrom, C. Pryke y M. W. E. Smith en *The Astrophysical Journal*, vol. 624, págs. 10-20; 2005.

Juegos matemáticos

Juan M.R. Parrondo

Finalmente... sudoku

Era inevitable. No podía pasar un mes más sin que el famoso sudoku apareciera en estas páginas. El "pasatiempo del verano" ha sido sin duda este sencillo rompecabezas de origen japonés que lleva ya varios años causando furor en el Reino Unido y que en pocos meses se ha hecho un hueco en las páginas de casi todos los periódicos de nuestro país. Podemos recibir sudokus incluso en el teléfono móvil.

El sudoku, por si alguien aún no lo sabe, consiste en rellenar un tablero cuadrado de 9 × 9 casillas, como el de la figura, con números del 1 al 9, de modo que no se repita ningún número en cada fila, en cada columna y en cada uno de los 9 bloques de 3 × 3 casillas delimitados por líneas gruesas. Cada sudoku se presenta con algunas cifras ya colocadas que determinan de forma unívoca el resto del tablero. Aunque se utilicen números para rellenar las casillas, el sudoku no tiene nada que ver con la aritmética; se trata de un rompecabezas de pura lógica: en lugar de números podrían utilizarse letras o colores. La clave para resolverlo es encontrar casillas en donde necesariamente debe escribirse un número determinado. En el sudoku de la figura, por ejemplo, el 8 del bloque inferior-izquierda debe estar en la casilla central, ya que el resto de las filas y columnas tienen ya un 8. Esta es una deducción no muy complicada. En ocasiones hay que tener en cuenta más posibilidades e incompatibilidades hasta dar con el número que necesariamente se debe colocar en una cierta casilla. Cada sudoku tiene su nivel de dificultad —desde "muy fácil" hasta "diabólico"—; que suele ser más alto cuanto menos números se presentan inicialmente (aunque no siempre es así).

5	3			7				
6			1	9	5			
	9	8					6	
8				6				3
4			8		3			1
7				2				6
	6					2	8	
			4	1	9			5
				8			7	9

A pesar de su sencillez, el sudoku plantea algunos problemas matemáticos y lógicos bastante complicados: ¿cuántos sudokus diferentes se pueden construir? ¿Existen algoritmos para resolver sudokus de forma automática? ¿De qué depende el nivel de dificultad de un sudoku? ¿Cuál es el mínimo número de cifras iniciales que determinan unívocamente el sudoku?

La primera de estas preguntas ha sido resuelta esta pasada primavera por Bertram Felgenhauer, de la Universidad Técnica de Dresde, y Frazer Jarvis, de la Universidad de Sheffield, con ordenadores personales y una buena dosis de lógica y combinatoria. El resultado es bastante sorprendente. El número de sudokus posibles es 6.670.903.752.021.072.936.960 ≈ $6{,}671 \times 10^{21}$. Es sorprendente porque puede escribirse como $(9!) \times 72^2 \times 2^7 \times 27.704.267.971$. Cada uno de estos factores puede explicarse razonablemente salvo el último de ellos, un número primo de tamaño considerable obtenido por Felgenhauer el 23 de mayo de 2005, tras seis horas de computación en dos ordenadores personales. El programa informático de Felgenhauer fue el fruto de una colaboración entre varias personas a través de un foro en Internet (www.sudoku.com/forums/viewtopic.php?t=44). Es fascinante seguir paso a paso las discusiones que mantuvieron durante días, en las que se conocieron Frazer y Bertram, hasta dar con la solución final. Aunque encontrar el número de sudokus no sea una gran proeza matemática, sí creo que es la primera ocasión en la que han quedado registrados de manera exhaustiva los avatares de una colaboración científica, desde el planteamiento hasta la solución final del problema. Un registro además muy humano, porque los mensajes están repletos de intentos fallidos, dudas y entusiasmo.

Encontrar el número de sudokus por el método de la fuerza bruta, es decir, pidiendo a un ordenador que rellene de todas las formas posibles las 81 casillas, es una estrategia inviable. El ordenador más potente tardaría años en terminar esta tarea. Felgenhauer y Jarvis tuvieron que simplificar el cálculo buscando simetrías en el problema hasta lograr que la búsqueda se redujera a unas cuantas horas. Veamos alguno de estos trucos. En primer lugar, no es difícil deducir el número de combinaciones posibles para los tres bloques superiores del tablero. Conviene denotar cada uno de los nueve bloques del sudoku de la siguiente forma:

B1	B2	B3
B4	B5	B6
B7	B8	B9

en donde cada bloque es un cuadrado de 3 × 3 casillas. El primer bloque, B1, se puede llenar de 9! = 362.880 maneras diferentes, porque 9! es el número de posibles reordenaciones de 9 elementos (en este caso, las nueve cifras). Supongamos la siguiente configuración para B1:

1	2	3
4	5	6
7	8	9

y veamos las posibles formas de rellenar B2. Los números 4, 5 y 6 tienen que estar en la fila superior o inferior de B2. Supongamos que llevamos los tres números a la fila superior. En este caso, 7, 8 y 9 deberán hallarse necesariamente en la fila central y 1, 2 y 3 en la fila inferior.

Si, por el momento, no nos ocupamos de la columna en la que colocamos cada número, concluimos: si 4, 5 y 6 están en la fila superior o inferior de B2, el resto de filas quedará completamente determinado. Por lo tanto, estas dos opciones dan lugar a 2 posibles configuraciones en B2 (siempre sin tener en cuenta las ordenaciones de los números en cada fila). Si en B2 colocamos el 4 en la fila inferior y el 5 y el 6 en la superior, obtendremos más configuraciones posibles:

B1			B2		
1	2	3		5	6
4	5	6			
7	8	9	4		

En la fila central superior debemos colocar ahora una cifra del conjunto {7, 8, 9} y en la inferior dos cifras del conjunto {1, 2, 3}. Esto lo podemos hacer de $3 \times 3 = 9$ formas distintas. Lo mismo ocurre si colocamos el 5 en la fila superior y el 4 y el 6 en la inferior. Hay $3 \times 2 = 6$ configuraciones de este tipo: dos elementos de {4, 5, 6} arriba y uno abajo, o viceversa. Por lo tanto, y siempre sin fijarnos en el orden horizontal de los números, tenemos $2 + 9 \times 6 = 56$ formas de colocar los números en B2. Pero si consideramos que los tres números de cada fila pueden ordenarse de $3 \times 2 = 6$ maneras distintas, llegamos a que el número de combinaciones posibles para B2 es $56 \times 6^3 = 12.096$.

Finalmente, si B1 y B2 están llenos, los números de cada fila en B3 quedarán completamente determinados. Tenemos de nuevo 6^3 ordenaciones de las tres filas. Por lo tanto, el número total de disposiciones para B1, B2 y B3 es $(9!) \times 56 \times 6^3 \times 6^3 = 948.109.639.680$.

Un cálculo de fuerza bruta supondría tomar cada una de estas disposiciones y probar con ella todas las combinaciones posibles para el resto de los bloques B4-B9. Sin embargo, este cálculo sigue siendo inviable. La idea de Jarvis y Felgenhauer es reducir las combinaciones B1-B3 a ciertas clases. Dos combinaciones B1-B3 están en la misma clase si tienen el mismo número de combinaciones B4-B9 compatibles. Apoyados en argumentos de simetría, redujeron el número de clases a 71. Detallar todos estos argumentos de simetría excede el espacio de esta sección. Algunos son muy simples. Por ejemplo, cualquier reetiquetado de los números en B1-B3 da lugar a una combinación de la misma clase. Como hay 9! reetiquetados, el número de combinaciones a estudiar se reduce a $56 \times 6^3 \times 6^3 = 2.612.736$. Otras permutaciones de los números, casillas, o ambos en B1-B3 reduce el número de clases a 71. De hecho, después de ejecutar el programa, Jarvis y Felgenhauer comprobaron que en realidad hay sólo 44 clases, una reducción que probablemente se deba a simetrías en las que ellos mismos no habían reparado. El lector interesado puede encontrar los detalles buscando "Jarvis" y "sudoku" en Google, para acceder a la página web en donde los autores han colocado una descripción exhaustiva de sus resultados y del método utilizado.

Otro participante en la discusión de la que hablábamos, Kevin Kilfoil, había llegado a un resultado bastante aproximado con un argumento sencillo y muy elegante. El argumento es el siguiente. Supongamos que sólo consideramos la regla "no pueden repetirse números en cada bloque". En ese caso, el número de posibles configuraciones es $(9!)^9 \approx 1{,}0911 \times 10^{50}$ ya que cada uno de los bloques admite 9! configuraciones. Si ahora consideramos la regla "no pueden repetirse números en cada fila", el número de configuraciones posibles se reduce. Hemos visto que, con esta regla, los bloques B1-B3 se pueden rellenar de $(9!) \times 56 \times 6^3 \times 6^3$ maneras distintas. Lo mismo ocurre para los bloques B4-B6 y B7-B9. Por tanto, con las dos reglas, la de los bloques y la de las filas, el número de configuraciones posibles es $[(9!) \times 56 \times 6^3 \times 6^3]^3$. La regla de las filas reduce entonces el número de configuraciones en un factor:

$$R = \frac{(9!)^9}{(9! \times 56 \times 6^6)^9} = \frac{(9!)^9}{56^3 \times 6^{18}} \approx 1{,}28 \times 10^{14}$$

La idea ingeniosa de Kilfoil es suponer que la regla "no pueden repetirse números en cada columna" actúa de forma similar, reduciendo el número de combinaciones por el mismo factor R. El número total de configuraciones de sudoku posibles sería entonces:

$$\frac{(9!)^9}{R^2} \approx 6{,}657 \times 10^{21}$$

El resultado final no es exacto. De hecho, no es ni siquiera un número entero, pero difiere de la solución exacta en sólo un 0,2 %. Es curioso que la hipótesis de que la regla de las filas y la regla de las columnas actúan de forma independiente dé lugar a una estimación tan correcta. Estamos ante un ejemplo de cómo atacar un problema combinatorio con argumentos aproximados y en cierto modo probabilísticos (podríamos reformular el argumento de Kilfoil suponiendo que la "probabilidad" de que una configuración que respeta la regla de los bloques respete también la de las filas o la de las columnas es 1/R y que estas probabilidades son independientes). Algo parecido a lo que vimos hace unos meses con los primos aleatorios de Hawkins [*véase* "Cribas y números primos", agosto 2005].

Quedan otras muchas cuestiones acerca de la combinatoria y matemática del sudoku. Nos preguntábamos al comienzo de este artículo si existe un algoritmo para solucionar cualquier sudoku. La respuesta es que existen varios: desde el cálculo por la "fuerza bruta", hasta la implementación en un programa informático de las mismas estrategias que utilizan los adictos al sudoku. En http://sudoku.sourceforge.net/ pueden encontrar un algoritmo de este tipo. Se trata de un programa Java de muy fácil uso que resuelve cualquier sudoku y explica las reglas que ha aplicado en la solución. Este programa permite saber además si un sudoku con algunos números ya colocados en ciertas casillas admite solución y si ésta es única. Es interesante jugar con el programa introduciendo números hasta llegar a sudokus con solución única, algo que no es fácil de conseguir.

Otra de nuestras preguntas iniciales es el mínimo número de casillas inicialmente llenas para un sudoku con solución única. Parece que es 17, pero nadie ha podido probarlo todavía. Una discusión muy amplia sobre este tema se puede encontrar también en el foro www.sudoku.com/forums/viewtopic.php?t=605.

Norbert Treitz

¿Por qué sube el nivel del agua?

Presión es fuerza dividida por superficie, se aprende en el colegio. Parece fácil y nos deja entender por qué es la presión la magnitud central de la mecánica de fluidos. Pero no es tan sencillo como parece. Se trata del cociente (escalar) del vector fuerza y del vector que describe la superficie (perpendicular a ésta); ambos vectores tienen que apuntar en la misma dirección. Para mostrar el hecho “verdaderamente trivial” de que este escalar es igual “en todas direcciones”, resulta, sin embargo, que hasta existen aparatos especiales.

Tomemos en su lugar un concepto mucho más cómodo, que ya ha demostrado su utilidad “en seco”, en el estudio de balanzas: la energía (*véase* “Curiosidades de la Física”, de septiembre 2005). Para no tener en cuenta el aporte de la capilaridad a la energía, no llenemos con nuestro fluido tubitos demasiado estrechos. A las energías de deformación no les tocará tampoco un papel relevante, pues los fluidos son casi incompresibles. (Un fluido apenas si disminuye de volumen con la presión; pero la mínima compresión que se produce es la que pone en movimiento —por medio de choques entre las moléculas— el agua del extremo remoto del cilindro cuando un émbolo presiona en el extremo próximo. No obstante, la energía de deformación es despreciable en el balance de energías.)

Como modelo de un barco en un lago nos serviría un trozo de madera en un vaso lleno de agua. ¿De qué modo variaría la posición del centro de masas común del barco y el agua si un gigante hundiese o sacase del agua el barco, o de nuestro modelo y su vaso si hiciésemos lo mismo con la madera? Cada centro de masa sigue un camino diferente; pero, ¿se compensan?

La única energía que aquí se ha de tener en cuenta es la energía potencial en el campo gravitatorio homogéneo, proporcional a la altura del centro de masas (respecto a una línea de referencia cero arbitraria). A un equilibrio estable le corresponde un mínimo local de la energía potencial; por tanto, el punto más bajo del centro de masas tiene que estar donde se encuentre cuando el barco flota. (Tras la intervención del gigante volverá a esa posición.) Hunda el barco o lo eleve, el centro de masas del sistema total se elevará.

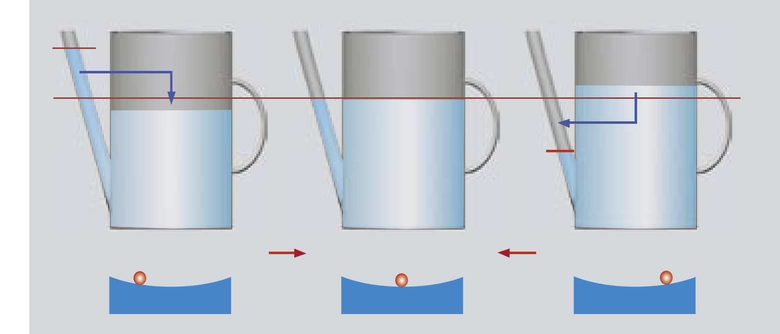
Resulta más evidente cuando se observa un tubo en forma de U. Sus brazos pueden tener diferentes anchuras y morfología irregular; basta con que no sean demasiado estrechos, para que la capilaridad resulte despreciable. El centro de masas del fluido está en su posición más baja cuando los “niveles”, las superficies límite con la atmósfera, alcanzan la misma altura en ambos brazos. En cualquier cambio que lo sacara de este estado, alguna parte del líquido pasaría por fuerza de un nivel inferior a otro superior, lo que haría subir el centro de masas. Esto también aclara por qué el agua se halla a la misma altura (*véase la figura 1*) en el cuerpo principal y en la boca de una regadera (o bien en unos “vasos comunicantes”).

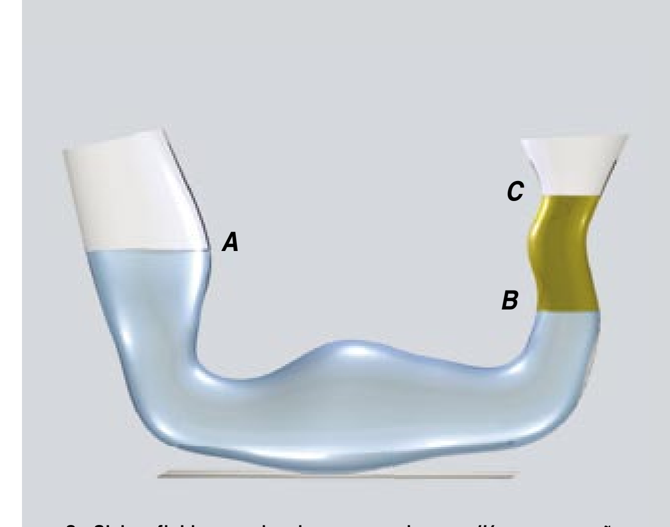
Cuando el agua se desplaza en un tubo en U, el centro de masas del fluido recorre una parábola abierta hacia arriba, si es que los brazos son cilíndricos y verticales, aunque no necesariamente igual de gruesos. Al mínimo, el vértice de la parábola, le corresponde el equilibrio, con ambas superficies en un mismo plano horizontal.

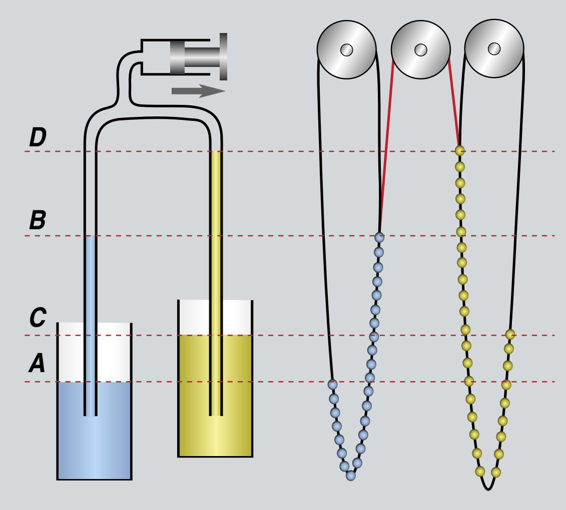
Mediciones de densidades: En uno de los lados del tubo en forma de U se añade un líquido más ligero, que no se mezcle con el otro. ¿Qué configuración de equilibrio se produce? Aquí ayuda imaginarse la materia tal como lo hacía Newton: constituida por partículas de igual peso (hoy nos referiríamos a los nucleones), empaquetadas unas veces con mayores espacios intermedios y otras con separaciones menores. Un vaso de cerveza reposa sobre una balanza. La mezcla de gas y cerveza se va ordenando verticalmente, de tal manera que al final el gas queda, en forma de espuma, sobre el líquido. La *quantitas materiae* (masa) no ha cambiado, la báscula marca lo mismo, la espuma, por así decirlo, es cerveza diluida en aire; pero también el hielo —expandido por los puentes de hidrógeno— es agua diluida en algo más de vacío.

Para el campo gravitatorio, el aceite viene a ser agua diluida hasta un volumen 1,25 veces mayor. Si en uno de los brazos hubiese una capa de aceite de 1 cm de altura, en el otro, en el equilibrio, debería haber una de 8 mm de agua, es decir, una capa de agua cuya superficie superior se encontrase 2 mm por debajo de la superficie superior del aceite. Que creciese la cantidad de aceite en un volumen infinitesimal dV depositado sobre el volumen inicial equivaldría a que bombeáramos un centímetro hacia arriba ese dV de aceite y al mismo tiempo bajáramos el mismo volumen de agua 8 mm (*véase la figura 2*). La energía potencial (y la altura del centro de masas común), expresada a través de una función del cambio de nivel, se mantiene horizontal con esos cambios, es decir, en un mínimo, como se puede observar con desplazamientos mayores.

1. Equilibrio estable y desequilibrios en la regadera.







2. Si los fluidos se desplazan un volumen *dV* muy pequeño hacia la derecha, un volumen *dV* del líquido azul descenderá de la altura *A* a la *B* y un volumen idéntico del amarillo subirá de *B* a *C*. Si sus densidades se comportan como las diferencias de altura, habrá un equilibrio estable.

3. Medición de las densidades según Watt, en una variante con volumen de aire reducido: la razón entre las densidades del líquido amarillo y del azul es (*B-A*):(*D-C*). En la analogía de las cadenas (*derecha*), la masa por unidad de longitud desempeña el papel de la densidad.

Así se pueden comparar con mucha facilidad densidades por medio del tubo en U (aun cuando esté deformado), siempre que los líquidos no se mezclen. ¿Es también posible sin tener que verter más líquido?

Según James Watt, para ello se debe utilizar un tubo en forma de U, que se introduce invertido en ambos líquidos; hay que insuflar una pequeña sobrepresión con una ramificación que se pueda cerrar. Para fluidos no venenosos, o habiendo tomado las medidas de seguridad correspondientes, vale también una bajada de presión; la altura útil del tubo apenas si está entonces limitada. O podría utilizarse una jeringuilla que aumentase el volumen de aire. Ese "trozo de aire" actúa como un volumen invariable, casi sin masa, que se puede desplazar.

O bien, se pueden dejar abiertos por arriba los tubos que se sumergen en los líquidos; a cambio hay que unir entonces entre sí con una manguera los espacios de aire que quedan sobre las superficies de los dos líquidos en sus recipientes y sellarlos para separarlos del aire de fuera.

Por si le molestara que ahora entre en juego el concepto de presión: en un experimento mental se podría utilizar algún líquido sin apenas masa, pero sí posee algo más —o algo menos— de volumen del que habría libremente en la manguera que conecta ambos niveles. En equilibrio estable, el líquido de ambos cabos del tubo en U se encontraría a un nivel inferior —respectivamente superior— que el que permaneciese fuera del tubo. El cociente entre esas diferencias sería el inverso de la razón entre las densidades (*véase la figura 3*).

Si nuestro aire encerrado —que para nuestros propósitos podemos considerar incompresible— se desplazara un volumen infinitesimal *dV*, en ambos extremos de la U una cantidad de líquido *dV* ascendería o descendería. Para que energéticamente resulte indiferente (posición horizontal de la energía potencial), las diferencias de altura tienen que ser inversamente proporcionales a las densidades.

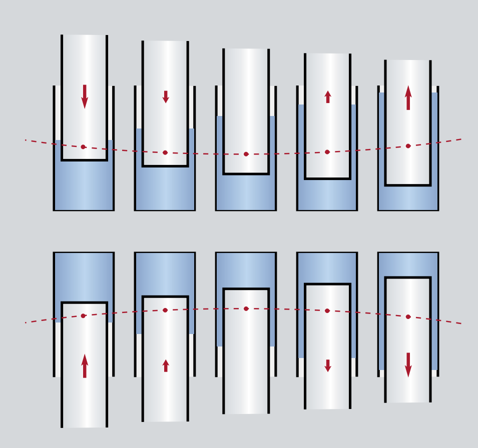
Parece increíble: no se requiere que ambos brazos del tubito presenten la misma anchura, ni siquiera ser cilíndricos; el resultado sólo depende de la razón entre ambas diferencias de altura. En el "cálculo" no intervienen esas alturas en sí, sino las variaciones de altura provocadas, es decir, las diferencias de altura donde el volumen se sustrae y se añade.

La figura 3 nos muestra una analogía con cadenas e hilos inextensibles sin masa que pasan por ruedas sin fricción. Por sí sola, cada cadena se halla en equilibrio si sus extremos cargados de masa están a la misma altura. El hilo rojo obliga a los extremos internos a situarse más arriba, pero deja que se reparta libremente esta elevación entre ambas cadenas gracias a la rueda central. El cociente viene determinado por la razón entre las masas por unidad de longitud de las cadenas.

Un cambio infinitesimal modificaría los cuatro niveles *A*, *B*, *C* y *D* en una idéntica diferencia *dh* hacia arriba o hacia abajo. Esto corresponde, por fuerza, a un desplazamiento de un trozo de la cadena de longitud *dh* de *A* a *B* y de un trozo de la otra cadena de *D* a *C*. En el equilibrio, esto es energéticamente indiferente si *B-A* y *D-C* son inversamente proporcionales a las masas por unidad de longitud.

Quien crea que debe abordarse la hidrostática con presiones, tendría que pensar en cómo depende de la altura la tensión del hilo. En ambos casos es más fácil mediante la energía, que además, a diferencia de la presión, no es una magnitud hidrostática especial, sino que desempeña el mismo papel allá donde haya un problema de equilibrio, en cualquier rama de la física.

A pesar de todo, la analogía no está exenta de trampas. En las cadenas, el papel fundamental lo desempeñan los pesos; en los fluidos, en cambio, cuentan las densidades. Se suele hablar de columnas de líquido (en vez de capas de líquido) y se asume así tácitamente que lo normal es que las secciones transversales sean iguales. De ahí la fuerza de la "paradoja hidrostática"; propone ésta que no importan las columnas, sino la integral de la densidad según la coordenada vertical, totalmente independiente de la sección transversal horizontal. Pero lo decisivo en todos los casos es el cambio de energía



4. Un barco (tubo interno) en un lago (tubo externo), en diferentes posiciones iniciales (*arriba*). Y lo mismo después de que se hayan invertido los tubos (*abajo*). Las flechas muestran en que dirección se desplaza el centro de masas común —el punto rojo sobre la línea discontinua— cuando el "barco" toma las posiciones indicadas.



5. Fuente de Herón: el volumen, aproximadamente constante, de aire encerrado está dibujado en color gris.

SIGANIM/SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

en un desplazamiento infinitesimal ("virtual") de idénticas partes de volumen infinitesimalmente pequeño para una diferencia de alturas, notable y mensurable.

¿De qué mecanismo se vale la fuente de Herón para lanzar por encima de cualquier nivel agua en el sistema? Se podría afirmar que el agua que sale del recipiente superior se lanza gracias a una sobrepresión, que con el aire, medio ligero, se puede "transferir" entre diferentes alturas sin apenas pérdidas (*véase la figura 5*). Pero también se podría decir: cuando se corta bien abajo el tubo de salida de una regadera llena, el agua sale lanzada hacia arriba. Aplicado a la fuente de Herón: con un tubo largo en vez del tubito de salida, las diferencias de nivel entre los niveles del agua de la "izquierda" y de la "derecha" serían iguales en el equilibrio. Pero como el tubito de la derecha es demasiado corto, el agua sale lanzada hacia afuera.

Volviendo al primer montaje para medir las densidades (esta vez con tubitos cilíndricos), sustituyamos la capa de aceite por un objeto sólido de igual densidad, por ejemplo un tapón sin fricción, de cierta masa, que tape casi toda la sección transversal. En caso de equilibrio estable no cambia nada. Pero se puede prescindir entonces de los dos brazos del tubo en U y dejar que el tapón flote.

Del tubo en forma de U al barco invertido: Escojamos ahora dos tubos cilíndricos de diferentes diámetros, uno transparente con líquido, el lago; el otro, insertado en el primero, el barco. Que la capilaridad vuelva inexactas las cosas, no cambia nada en el equilibrio estable: si sumergimos algo más el tubo del interior y lo soltamos, volverá a su sitio, pero también si lo elevamos algo y luego lo soltamos.

¿Hay también equilibrios inestables? Para conseguir uno, agarremos firmemente ambos tubos manteniendo el del interior un poco hundido, invirtámoslos con un gesto decidido y soltemos inmediatamente el tubo interior (el "barco"). El agua se saldrá enseguida, pero aun así podremos observar antes que el tubo asciende. Si realizamos el mismo experimento con el barco algo levantado en vez de hundido, caerá fuera inmediatamente, lo que sorprende menos. La solución del rompecabezas: al invertir el campo gravitatorio con respecto al sistema, el mínimo local de energía se ha convertido en un máximo, y el equilibrio estable en inestable.

Preguntas de concurso

La llave del barco en el lago: Desde un barco se tira una llave al agua. ¿Sube o baja el nivel del agua del lago? Por favor, primero intente resolverlo, luego realice el experimento con lo que encuentre en casa y por último, siga leyendo. La llave desaloja bajo el agua su propio volumen, pero en el barco su peso equivale a una cantidad de agua igual de pesada. Si usted ha pensado "en cualquier caso, mucha no puede ser la diferencia", la razón le asiste; pero se podría calcular para un lago y una llave concretos la cantidad de capas de átomos. Si la llave tuviera una densidad menor que el agua, entonces debería distinguirse si puede flotar tras ser arrojada (indiferente para el nivel del agua) o si un submarinista la adhiere al fondo.

La botella inclinada: Cuando se inclina algo una botella parcialmente llena, sube el centro de masas. ¿Sube más si el contenido está líquido o si está congelado, es decir, si la superficie gira o si permanece horizontal (suponiendo que la densidad no varía)? La respuesta es muy sencilla: no puede ser que cuando el contenido congelado se derrite en la botella inclinada y la superficie se dispone horizontalmente el centro de masas haya subido, y si así se hubiera mantenido a la misma altura, no habría habido razón para el cambio de forma.

El centro de masas en el recipiente que se llena: Martin Gardner, el legendario autor de "Juegos matemáticos", se preguntaba en 1972 en SCIENTIFIC AMERICAN cuándo encontrará su altura mínima el centro de masas común del recipiente y del contenido a medida que se llena una lata de cerveza inicialmente vacía. Describía un experimento mental con cerveza congelada en una lata que se mantenía en equilibrio tumbada sobre un cuchillo y llegaba a un resultado parcial notable: el centro de masas pasa por su punto más bajo justo cuando se encuentra sobre la superficie del líquido.

Sin recurrir al experimento mental, hay una explicación muy fácil: mientras se añada líquido que acabe debajo del centro de masas instantáneo, éste bajará; en caso contrario, subirá. Para ello no hay que hacer ninguna suposición sobre la forma o repartición del peso del recipiente, hecha la salvedad de que el líquido ha de poder llegar al centro de masas del recipiente vacío. Con la mayor elegancia, se puede así prescindir de la lata.

Medicina antigua

Revisada

ANTIKE MEDIZIN. EIN LEXIKON. Dirigido por Karl-Heinz Leven. Verlag C. H. Beck; Múnich, 2005.

MEDICINE IN THE DAYS OF PHARAOS, por Bruno Halioua y Bernard Ziskind. The Belknap Press of Harvard University Press; Cambridge, 2005.

HEALTH IN ANTIQUITY. Dirigido por Helen King. Routledge. Londres, 2005. ANCIENT MEDICINE, por Vivian Nutton. Routledge. Londres, 2004.

ARISTOTELES UND DAS *CORPUS HIPPOCRATICUM*. DIE ANATOMIE UND PHYSIOLOGIE DES MENSCHEN, por Carolin M. Oser-Grote. Franz Steiner Verlag; Stuttgart, 2004. ASKLEPIOSMEDIZIN. MEDIZINISCHER ALLTAG IN DER RÖMISCHEN KAISERZEIT, por Florian Steger. Franz Steiner Verlag; Stuttgart, 2004.

El estudio de la medicina clásica ha experimentado una profunda renovación en métodos y campos de investigación, cuyos primeros frutos empiezan ya a recogerse. Sin desaparecer del todo, la atención antaño dirigida hacia figuras preeminentes o descubrimientos y avances significativos se ha desplazado hacia las teorías y las prácticas, la aportación de grupos ajenos a la academia (cortadores de raíces y herbolarios), la que empieza a conocerse por medicina del templo, así como la presencia creciente de la figura femenina en el proceso terapéutico. Comenzamos ya a disponer de cabales resúmenes de autores, conceptos e instituciones (*Antike Medizin. Ein Lexikon*), marcos generales de sociología sanitaria (*Health in Antiquity*), exposiciones sistemáticas generales, espléndidas las de Vivian Nutton (*Ancient Medicine*), y la de Bruno Halioua y Bernard Ziskind (*Medicine in the Days of Pharaos*) y tesis de grado que combaten tesis envejecidas (*Aristoteles und das Corpus Hippocraticum*) o traen a primer plano una cuestión postergada (*Asklepiosmedizin. Medizinischer Alltag in der römischen Kaiserzeit*). El período cubierto abarca desde 25 siglos antes de Hipócrates hasta Pablo de Egina, en el siglo VII d.C.

En particular, nuestra aproximación a la medicina egipcia se ha beneficiado de la depuración de la teoría y método arqueológicos seguidos por un número creciente de expediciones, así como de la aplicación de nuevos modelos y técnicas al examen de los restos momificados y a la traducción de los papiros. De éstos, el más extenso e importante es el de Ebers, conservado en la biblioteca de la Universidad de Leipzig; con más de 20 metros de longitud y 30 centímetros de ancho, consta de 108 páginas de 20-22 líneas; data del 1500 a.C., del reinado de Amenhotep I, si bien parece copia de otro más antiguo, y es un tratado de farmacología y terapéutica. Deben añadírsele los papiros Smith, de Hearst, de Kahun, de Londres, de Chester, Leyden, Brooklyn y otros.

Se sabe que los médicos recurrían a su capacitación profesional y a la magia para tratar a sus pacientes; lo hacían por separado o en combinación. Por esa doble vía se pretendía incidir también en la mente del enfermo. El arte se transmitía de padres a hijos, reservado a una élite de iniciados, en el marco de una sociedad regulada, en todos sus aspectos, por la religión, que obligaba del faraón al último de los súbditos.

El papel activo de la magia, pese al evidente progreso hacia una racionalidad que se iba afianzando con la experiencia acumulada, prueba que nos desenvolvemos todavía en una fase arcaica de la medicina. El jeroglífico que designaba a sus profesionales combinaba tres tipos de signos: dos elementos fonéticos, una flecha y el símbolo de un hombre sentado. Acostumbra distinguirse entre el médico formado en los libros (el *swnw*) y el sacerdote que actúa por inspiración sobrenatural (el *wab* de Sekhmet), una división que pasará a la Grecia hipocrática con la separación entre el sanador inspirado (*ierus*) y el profesional experimentado (*iatros*). La formación, iniciada por transmisión oral del progenitor, se completaba en las casas de la vida, anejas al templo. Los papiros médicos sugieren que los sacerdotes *wab* de Sekhmet glosaban a sus pupilos textos canónicos. Andando el tiempo, dos santuarios se convertirían, además, en centro de peregrinaje en busca de salud: el templo del "Santo de los santos", dedicado a Imhotep y Amenhotep, en Deir el-Bahri, y el templo de Hathor en Dendera. Este segundo, consagrado al dios Hathor, contaba con un centro de hidroterapia al que se accedía por un pasillo de estatuas sanadoras.

El acto médico constaba ya de tres fases: examen, diagnóstico y pronóstico. La primera comprendía, amén del cuestionario trivial, la inspección de la cara, la orina, las heces y la expectoración. Se observaban atentamente las heridas y deformaciones de la piel, en busca de signos de edema o hematoma. Se exploraba el alcance de una lesión ósea o la médula espinal, si se sufría rigidez. Para remediar el mal, se contaba con una farmacopea excepcional de los tres reinos. Entre las sustancias minerales, y amén de sulfuro de arsénico, piedra de Menfis (barro), malaquita, arena o antimonio, recuérdense: el alabastro, para la preparación de ungüentos para la piel; el ocre amarillo (una arcilla rica en hidróxido de hierro) para tratar el tracoma y



1. Anubis, dios de la muerte, con la momia de Sennutem. (De la tumba de éste en Deir el-Medina.)

la alopecia; de aplicación oftalmológicas la galena (sulfuro de plomo) y cierta aleación de cobre y zinc; las limaduras de cobre, contra las mordeduras de serpiente. En las plantas se encontraban laxantes (sicómoro, coloquíntida, higos, aceite de ricino y áloe) y diuréticos (enebro). Aprovechaban las propiedades astringentes y antipiréticas de la corteza del sauce y aliviaban el dolor con adormidera (*Papaver somniferum*) y mandrágora. La levadura de la cerveza es recomendada para las infecciones intestinales y enfermedades de la piel. De las 1740 recetas que nos han llegado, más de la mitad mencionaban sustancias de origen animal.

La cirugía alcanzó quizá cierto grado de especialización. A propósito de los tumores, el papiro de Ebers habla del "hombre del cauterio". El registro arqueológico, por lo demás, ha aportado bisturíes, cuchillas y fórceps. Protegían las heridas con lino. (La especie *Linum usitatissimum* se venía cultivando desde muy antiguo.) Sus convicciones religiosas les impedía acometer disecciones sobre los cadáveres, lo que explica sus limitaciones en anatomía. Venas, arterias o conductos linfáticos, todo eran "canales" o "vasos". Ello no fue óbice para que la fama de la medicina egipcia recorriera la cuenca mediterránea. Testimonios paleográficos y arqueológicos aluden a médicos enviados a cortes reales extranjeras. Por tabletas de arcilla de Tell el-Amarna sabemos de algunos idos a Mitanni y Ugarit. En esos viajes no dudaron en aprovechar las posibilidades encontradas en el país de destino: la tradición botánica de Creta, por ejemplo, o el recurso minoico de los encantamientos.

Se debate hoy hasta qué punto la doctrina y el ejercicio de la medicina reflejados en los papiros puede aplicarse a otras regiones del mundo clásico. Constipados, pneumonía y pleuresía eran comunes en invierno y diarreas en verano. Abundan relatos sobre lepra, enfermedades renales y vesiculares, que se completan con los signos de fracturas, artrosis y dislocaciones. Nadie cuestiona la importancia, en la zona, de las enfermedades infecciosas (lepra la más insidiosa) y parasitarias, algunas promovidas por la instauración de la agricultura de irrigación. Particularmente nocivos en el Mediterráneo oriental fueron los hemoparásitos *Schistosoma sp.* (agente de la esquistosomiasis) y el mosquito *Anopheles*, propagador de la malaria; en concreto la malaria causada por *Plasmodium falciparum*, una de las enfermedades más virulentas e incapacitantes que afectó al Egeo prehistórico y condicionó la evolución de la historia social de la región. *Plasmodium* vive en el cuerpo de *Anopheles* y transmite la enfermedad a los humanos a través de la picadura de la hembra. Los parásitos avanzan velozmente por la corriente sanguínea y llegan al hígado, donde se reproducen en un período de incubación de catorce días. De vuelta a la sangre, atacan a los eritrocitos, que se disgregan. Suele ser letal. La malaria se difundió por Grecia continental, en particular desde los humedales de Beocia y la Argólida.

En la propagación de otras enfermedades contribuyeron las migraciones, que suponían el trasiego de gentes con los animales domésticos y sus patógenos. Los restos esqueléticos y la dentición nos facilitan el cuadro sanitario. Descubrimos así que, para los varones, la esperanza de vida en la Creta Minoica debió de variar entre un 35,24 años en el período Minoico inicial (c. 2100 a.C.) hasta los 30,84 años en el Minoico tardío (c.1375-1300 a.C.); para las mujeres la esperanza de vida era inferior. Y nos revelan una dieta basada en la harina de cereal.

A Egipto acudieron Tales de Mileto (640-548 a.C.) y Pitágoras (580-490 a.C.), este último recibido por el faraón Ahmosis II. Su pensamiento, lo mismo que el de Homero, Píndaro, Platón, Herodoto y Solón fue conformado en buena medida por la cultura del Nilo. (Se dice que el propio Platón visitó Heliópolis en torno al 390 a.C.) Representantes de las tres escuelas principales de la medicina griega de Crotona, Cnido y Cos establecieron también contacto con médicos egipcios. Las semejanzas entre las ideas de Cnido y Egipto sobre los efectos de la enfermedad en el cuerpo resultan llamativas; el principio mórbido (*perittoma*) de la escuela de Cnido, muy parecida a la noción



2. Padiamanet quema incienso en honor de Osiris. (Procedente de un papiro de la Dinastía 22.)

egipcia de *wekhedu*, pudiera ser un caso de influencia directa. El propio Hipócrates recibió la influencia del pensamiento médico egipcio.

Pero Hipócrates es deudor también de sus antecesores presocráticos. De Homero, para quien en todo egipcio varón hay escondido un médico; profesión que parece haber ejercido el relator de la *Iliada*, enrolado en el ejército de Agamenón, en la batalla de Troya, según se desprende de la lectura de dicho poema y su descripción de las heridas. En ese período presocrático, los vínculos entre la filosofía y la medicina se remontan a Pitágoras y Parménides. Aquel, con su concepción de los números, influiría en la doctrina de los días críticos, días de importancia particular en el curso de una enfermedad. Muy discutida es la filiación pitagórica de la escuela médica de Crotona, representada por la figura eximia de Alcmeón (siglos VI-V a.C.), de particular relieve en la anatomía de los nervios y de los vasos sanguíneos. Su interés se extendió hacia la embriología y diferenciación sexual. Sostuvo una relación directa de los sentidos con centros cerebrales a través de determinados canales. Se alcanzaba la salud cuando se lograba el equilibrio de cualidades opuestas; se enfermaba cuando la ecuación se decantaba hacia un miembro de la misma. No se trata, pues, de una armonía fundada en una proporción específica, sino de una mezcla absoluta de todas las fuerzas del cuerpo; no son los elementos, sino las cualidades o potencias las que precisan mantenerse.

A otro filósofo natural, Empédocles, va asociada la escuela médica de Agrigento. Se le conoce por haber esbozado la doctrina de los cuatro elementos (aire, agua, fuego y tierra), cuyas diferentes razones proporcionales explicaban la diversidad de sustancias. La sangre constituía un equilibrio cabal de los cuatro elementos. A partir de ella se formaba el tejido muscular. Hueso y tendones tenían diferentes proporciones. El ojo contenía los cuatro elementos, pero la visión dependía en buena medida del fuego y del agua. La digestión formaba parte de un proceso mecánico. En la mezcla y separación de los elementos por dos principios opuestos se fundaban el origen de la vida, el desarrollo, la estructura y función de los organismos, así como la salud y la enfermedad. Pero no todo en él fue geometría y esquematismo. En su poema *Katharmoi* (*Purificaciones*) defendía una medicina expiatoria.

En el último tercio del siglo V a.C. florecieron dos filósofos con intereses médicos, Diógenes de Apolonia y Demócrito de Abdera. El primero abordó temas tratados por Alcmeón y puso el origen de todo en el aire, incluidos pensamiento y sensación. Sin ejercer la medicina, la sombra del atomista Demócrito se extendió hasta el período romano, para resurgir, en diferentes versiones y ocasiones, a lo largo de la historia de Occidente. Escribió sobre prognosis y dietética. Interesado por la anatomía animal, atribuía el parto múltiple a la existencia de una matriz compartimentada, idea que pasaría a un autor hipocrático para explicar el parto gemelar. Se le atribuye un epistolario, espurio, con Hipócrates, que vivió en el siglo V a.C. y es reconocido progenitor de la medicina científica racional y su sistematizador a través de un *Corpus* cuya redacción se extendió, en realidad, a lo largo de seis o siete siglos, desde el inicial *Sobre las hebdómadas*, cuyo título remite a la importancia cósmica del número siete (siete fases de la luna, siete vientos, siete partes del año, siete edades humanas) y el paralelismo entre el macrocosmos y el microcosmos (hombre).

La *Colección hipocrática* que nos ha llegado consta de una sesentena de obras escritas en dialecto jónico. En la forma en que la conocemos se conformaría en Alejandría de Egipto. El grueso de la misma se crea entre la segunda mitad del siglo V a.C. y la primera del IV. Participan dos escuelas asclepíadas, la de Cnido y la de Cos. De Cnido proceden *Sobre las enfermedades* y *Enfermedades II*, que siguen la orientación de unas *Sentencias cnidias*, criticadas por Galeno, *Sobre la generación* y *Sobre la naturaleza del niño*, así como los de tema tocoginecológico *Sobre la naturaleza de la mujer, Sobre las enfermedades de la mujer* y *Sobre las mujeres estériles*.

De la escuela de Cos, que se caracteriza por una mayor atención al diagnóstico y a la moderación en la terapia, proceden *Sobre la dieta en*

las enfermedades agudas, *Sobre los aires, las aguas y los lugares*, *Sobre la naturaleza del hombre*, los *Pronósticos*, *Aforismos*, parte de las *Epidemias* y los tratados quirúrgicos *Sobre las heridas de la cabeza, Sobre las fracturas* y *Sobre las articulaciones*. (En esta última, aparece la descripción clásica de un jorobado, cuya deformidad estaba causada por tuberculosis.). Los siete libros de las *Epidemias* se escribieron en tres fechas diferentes (1 y 3, en torno al 410 a.C.; 2, 4 y 6, en torno al 400 a. C.; 5 y 7, entre el 358 y 348 a.C.), probablemente por diversos autores. *Sobre la generación* y *Sobre la naturaleza del niño* integrarían en un comienzo parte de una misma obra. Y *Aires, aguas y lugares* y *Sobre la enfermedad sagrada* podrían llevar la firma de un mismo estudioso.

La atención de los sofistas a las cuestiones de método y epistemológicas se refleja en los tratados relacionados con la naturaleza de la medicina, con el estatuto del arte: *Sobre la naturaleza del hombre, Sobre la medicina antigua, Sobre los lugares en el hombre* o *Sobre la dieta*. Más o menos por la época en que se redactaron, Platón escribía su *Protágoras*, donde ratifica la procedencia coica de Hipócrates. La autoridad del *iatros* estaba lejos de ser aceptada por todos. El autor de *Sobre el arte* tenía que defender la medicina frente a los que habían convertido en arte atacar al arte y negaban la validez de la medicina porque algunos se curaban sin la intervención del médico, en tanto que otros morían pese a los esfuerzos de éste. El autor de *Sobre la medicina antigua* no sólo rechazaba la entrega absoluta al azar, sino que, además, abomina de los filósofos, léase Empédocles, que creen en hipótesis absurdas. Hipótesis absurda, indica el autor de *Sobre la enfermedad sagrada*, es defender que la epilepsia, la manía y otros trastornos mentales están causados por los dioses y, por consiguiente, necesitan remedios religiosos.



3. Galeno explicando su teoría farmacológica a sus seguidores. Menos entusiastas se muestran Asclepiades, Arquigenes y Erasístrato. (Manuscrito Db 93, folio 390r. Biblioteca de Dresde.)

¿Cuál fue la relación de Aristóteles con el hipocratismo? ¿Conoció Aristóteles algunos escritos hipocráticos? Carolin M. Oser-Grote enhebra un análisis de una más que mediana dependencia doctrinal. Sabido es que el estagirita fundó en el dominio de la biología su filosofía natural. Parte del método científico, cuyos principios había esbozado en los *Analytica posteriora*, que aplica a la zoología en el primer libro del *De partibus animalium*. Aristóteles se sirve de los hechos del mundo empírico, analiza las observaciones y las clasifica, al tiempo que crea una nueva terminología. Reparte los organismos entre dotados de sangre y exangües, la división que Lamarck convertiría en vertebrados e invertebrados. Aristóteles agrupa bajo esa división sus grandes géneros: aves, peces, cetáceos, hombre, tetrápodos, testáceos, crustáceos, cefalópodos e insectos. Esos grandes géneros se subdividían a su vez en géneros de alcance más restringido y éstos, a su vez, en especies. A éstas las caracterizaba una diferencia distintiva, formal. De ese modo, Aristóteles se convirtió en fundador de la anatomía comparada. La graduación de las diferencias le llevó a la idea de la escala de los seres. Al estudio de la anatomía, la fisiología y el comportamiento consagra varias obras: *Historia animalium, De partibus animalium* y *De generatione animalium*, amén de los opúsculos agavillados en *Parva naturalia*.

El interés de Aristóteles por la anatomía le venía de familia. Su padre Nikomakos, del clan de los asclepíadas, fue médico al servicio del rey Amyntos III de Macedonia. Y él mismo emprendió un famoso experimento sobre el desarrollo de las aves desde el huevo y tendió puentes de analogía entre organismos animales y el hombre. Ahora habrá que añadir su inspiración en *Sobre la enfermedad sagrada* y otros tratados hipocráticos.
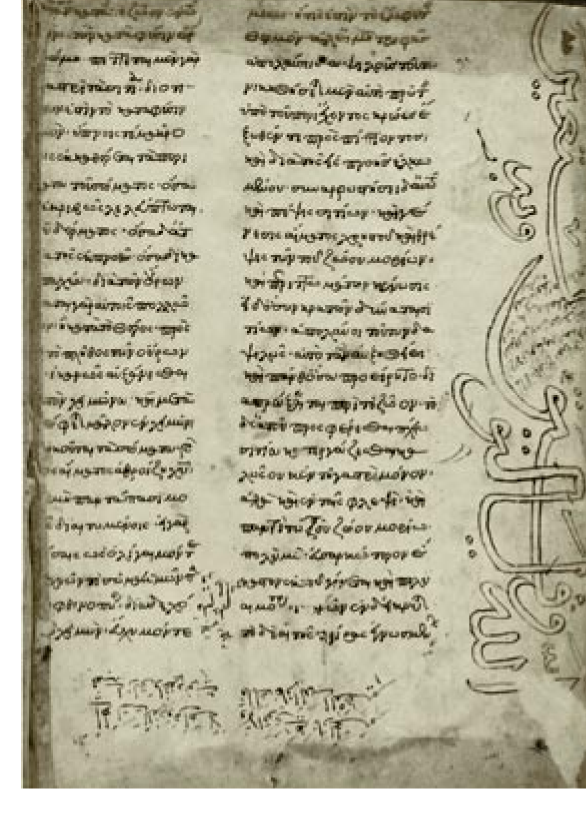
En la *Colección* no aparece un número de humores fijo y acordado por todos. Lo que no obsta para que buena parte de los autores concedieran preeminencia a dos fluidos visibles, la flema y la bilis. En el primer caso, su denominación griega nos remite a una sustancia asociada con la combustión o la enfermedad

inflamatoria. Todas las enfermedades humanas surgen de la bilis y la flema, declaraba el autor de *Sobre las afecciones*. Para el médico hipocrático, la enfermedad entrañaba un desorden o desequilibrio en el sistema de fluidos internos, incluido el propio *pneuma*, lo mismo en el varón que en la mujer. Pero no sólo es materia mórbida la que parece en exceso o defecto; también pueden serlo los aires.

Los fenómenos del mundo natural repercuten en el estado de la salud o de enfermedad. El autor de *Sobre el régimen* declara que es necesario que el médico conozca no sólo la constitución de su paciente, sino también las estaciones del año, los aires, el tiempo, la región geográfica, el orto y el ocaso del sol. *Aires, aguas y lugares* constituye el ejemplo más celebrado de esa medicina geográfica o meteorológica.

Pocos episodios de la medicina antigua se han estudiado con tanta profundidad y provecho como la aparición y el desarrollo de la anatomía humana en la primera mitad del siglo III a.C. en Alejandría. Una empresa que cargaron sobre sus hombros Herófilo y Erasístrato, quienes, disección mediante, revelaron numerosas estructuras del cuerpo humano. Herófilo de Calcedonia discrepaba de la prognosis hipocrática y, aunque basaba su fisiología y patología en la teoría de los humores, su interpretación no coincidía necesariamente con la de *Sobre la naturaleza del hombre*. Sólo fragmentaria nos ha llegado la información concerniente a las doctrinas de Erasístrato de Ceos. Según parece, descubrió las válvulas del corazón y observó su funcionamiento.

La asimilación de la medicina griega por el mundo de lengua latina constituye uno de los momentos decisivos de la historia de la ciencia. Un sistema doctrinal se transplantó en otro de lengua y tradición diferentes. Sin ese trasvase, la medicina griega hubiera sido una más, como la babilónica o la egipcia. El inicio del proceso va unido al nombre de Arcagathus, hijo de Lisanias, en el 219 a.C. Con la aprobación del Senado Romano, hacia mediados del siglo I a.C., se había convertido ya en signo de distinción el empleo de un médico griego. Aremidoro, médico procedente de Perga, había adquirido la ciudadanía romana en torno al 80 a.C. Aunque, con mucho, el médico inmigrante más influyente de la Roma republicana fue Asclepíades de Bitinia, quien de creer a Plinio había sido con anterioridad un frustrado profesor de retórica. Asclepíades sostenía que el cuerpo estaba constituido por partículas invisibles y que la salud constituía una función de su movimiento libre y equilibrado a través de poros.



4. Comentario de Galeno a los *Aforismos* de Hipócrates. (Instituto de Estudios Orientales de San Petersburgo.)

La transformación del mundo romano bajo Augusto (que reinó desde el 31 a.C. hasta el 14 d.C.), heredero de Julio César, amén de un cambio de forma de gobierno, supuso una revolución social y geográfica, a medida que Roma extendía su poder hasta el Rhin, el Danubio y el Eufrates. La población de la urbe se multiplicó. Arribaron médicos griegos de Tebas, Nicea, Laodicea, Esmirna y otros puntos cultivados. Una misma medicina y casi unos mismos fármacos circularon en latín y en griego. Se nos adelanta con Scribonius Largus y sus *Recetas farmacéuticas*, de finales del año 47 o principios del 48. El libro consta de 271 recetas, dividido en tres secciones principales. El grupo primero y más extenso (1-162) aparece organizado de acuerdo con las enfermedades, de la cabeza a los pies, del dolor de cabeza y la epilepsia hasta la gota.

Cuando en torno al 70 d.C. Plinio el Viejo ponderaba los avances de la medicina en su *Historia Natural* no ahorró recriminaciones. Consideró la recepción acrítica de la medicina griega por Roma un reflejo del declive moral, el triunfo del lujo sobre las viejas virtudes romanas. Pero en Roma no había un hipocratismo único, sino una multiplicidad de sectas. El Metodismo, la más genuinamente romana. Así denominado por su declaración de seguir un método de sanar, único y eficaz, dominó el panorama romano a lo largo de tres siglos y, aunque sus orígenes se esconden entre los médicos griegos residentes en Roma, su influencia se extendió por todo el Imperio. De las principales obras del Metodismo, sobresalen el tratado *Sobre las enfermedades crónicas y agudas* de Caelius Aurelianos, escrita en latín, la *Ginecología* de Soranus, redactada en griego. Entre sus rivales, los Pneumáticos, con su énfasis en el *pneuma*, como factor controlador de la salud y la enfermedad, fueron los más importantes.

Pero la medicina imperial ha pasado a la historia asociada a la figura de Galeno (129-199), cuya doctrina anatómica y fisiológica se convertiría en canon a lo largo de quince siglos. Natural de Pérgamo, y estudioso de la medicina en diversos centros de la cuenca del Mediterráneo oriental, recaló por fin en Roma, donde asistió a cuatro emperadores. Asimiló el pensamiento de Aristóteles e Hipócrates, con cuya interacción creó su propio sistema. Asentó su medicina sobre la anatomía, a la que dedicó numerosos escritos, desde opúsculos elementales sobre huesos, nervios, venas, arterias y músculos, hasta un manual de disección. Aunque era consciente del peligro que encerraba la extrapolación del bruto al hombre, la verdad es que sus descripciones se resienten a menudo de esa confusión. Sus disecciones (con mamíferos, monos incluidos) le reforzaron su doctrina de los tres sistemas: el hígado, el corazón y el cerebro fundaban tres sistemas paralelos, cada uno de los cuales cumplía una función distinta.

—LUIS ALONSO

Mark Fischetti

PROTOTIPADO RAPIDO

Dicho y hecho

Antes de iniciar la manufactura de un producto nuevo, las empresas fabrican de forma artesanal modelos o prototipos para comprobar la viabilidad del diseño, valorar el aspecto, ensayar el ajuste y el funcionamiento con otras piezas o hacer la puesta a punto final de moldes y coquillas. Durante decenios, estos prototipos se han venido trabajando a mano. Una práctica lenta y cara. Pero en años recientes, varias técnicas de prototipado rápido, que producen de forma automática piezas tridimensionales a partir de datos procedentes del diseño asistido por ordenador, han acelerado este proceso preliminar: el tiempo de prototipado se ha reducido de semanas a días u horas.

Fabricantes de automoción, de productos de consumo, de equipamiento médico y, en general, todos aquellos que necesitan construir muestras para sus clientes son sus más ávidos usuarios. Los objetos se obtienen por adición sucesiva de finas capas de resina, plástico extrudido o polvo de fundición, que luego se endurecen.

La estereolitografía fue la primera de estas técnicas; ahora es la más extendida (se ensayaron quizás otros treinta procesos, pero sólo cinco o seis han resultado eficaces). Se utiliza también el modelado por deposición fundida y las impresoras 3D, que producen piezas en grandes cantidades con rapidez y baratura, aunque acaso resulten algo menos precisas y duraderas. Una máquina de estereolitografía puede costar de 150.000 a 400.000 euros; una impresora 3D está entre los 20.000 y los 50.000 euros.

El tamaño de los objetos así fabricados suele ser inferior a los 60 centímetros en los tres ejes *X*, *Y* y *Z*. Sin embargo, están apareciendo máquinas que admiten dimensiones mayores. Algunas producen artículos comerciales directamente, sin necesidad de moldes, coquillas y mecanizado. Pero la mayoría de esos productos pugnan aún por igualar las propiedades mecánicas, térmicas, la durabilidad y el bajo coste de los fabricados de forma artesanal. Con todo, cuando el volumen de producción es reducido, el coste elevado y la forma del objeto complicada, el prototipado rápido constituye la mejor opción. La mayoría de los audífonos, por ejemplo, se fabrican mediante este método, ya que cada pieza debe hacerse a la medida del canal auditivo del paciente.

El mercado del prototipado rápido crece velozmente. Según sus defensores, el paso siguiente será la fabricación rápida, conforme se logren materiales más resistentes y se mejore la precisión.

1. EN LA ESTEREOLITOGRAFIA, un programa informático convierte los datos de diseño de un objeto en una serie de finas secciones transversales. Una plataforma perforada sumergida en una cubeta llena de un polímero líquido fotosensible asciende a la superficie. El líquido borbotea a través de la plataforma; una cuchilla barre ésta de un lado a otro, dejando una película. Un láser ultravioleta, orientado por un espejo, traza la primera sección transversal, convirtiendo en sólido porciones precisas del recubrimiento. La plataforma desciende ligeramente; la cuchilla pule el líquido inmediato al área solidificada. El láser endurece una segunda capa sobre la primera, y así, una y otra vez, hasta obtener la estructura deseada. Si es necesario, se añaden montantes de soporte que luego se retiran.



2. LOS PROGRAMAS DE DISEÑO POR ORDENADOR pueden definir un objeto como una serie de triángulos; así codifican, si bien de forma basta, los datos del modelado del sólido. La máquina de estereolitografía redefine luego el modelo en forma de capas para fabricación.

GEORGE RETSECK

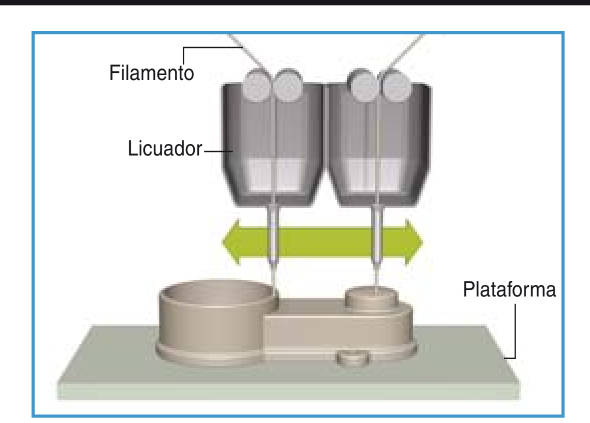
¿SABIA USTED QUE...?

➤ **AÑADASE CALOR:** El proceso de sinterización selectiva por láser se está empleando cada vez más. Un láser forma las capas mediante la fusión de nailon termosensible o polvo metálico que se extiende sobre una plataforma similar a las empleadas en la impresión 3D. Permite obtener productos finales; se utiliza sobre todo en la fabricación de audífonos y otros artículos que deban hacerse a la medida del cliente. A esta técnica se recurre también para la fabricación de conductos de aire para los cazas Boeing F-18 y piezas para la lanzadera espacial estadounidense o la Estación Espacial Internacional.

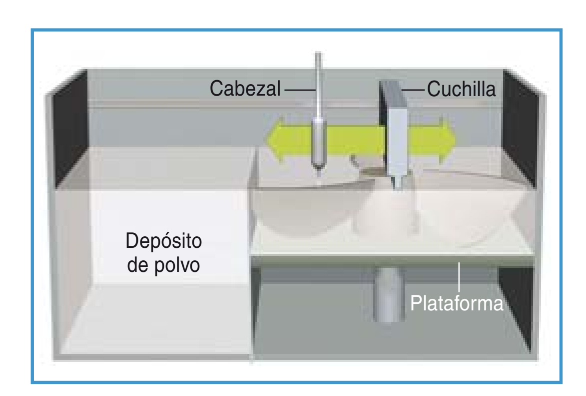
➤ **3D CASERA:** Según los entusiastas, llegará el día en que cualquiera podrá construirse sus propias baterías de cocina o piezas para el automóvil con una máquina de prototipado rápido instalada en casa, a partir de datos enviados en línea por un proveedor. Otros, en cambio, opinan que ello no sucederá, mientras la gente tenga la opción de comprar a buen precio el mismo producto en el centro comercial más cercano. Quizá los ingenieros apostarían por este sistema de trabajo, pero serán los niños los verdaderos protagonistas. El juego de diseño por ordenador SimCity, por ejemplo, emplea datos 3D: una impresora 3D fabricaría, por tanto, toda clase de artículos. En diez años, si el precio de las impresoras desciende, imagínense qué trabajos escolares podrían hacer los niños.

➤ **DE GAS A SOLIDO:** Pese a los numerosos materiales empleados en estereolitografía, la mejora de la calidad y la reducción de los costes se ha logrado merced al cambio de los láseres de gas por los de estado sólido. Los de gas ofrecían menor precisión y escasa durabilidad.

Lentes
Espejo direccionable
Cuchilla
Modelo
Plataforma
Polímero líquido



3. EN EL MODELADO POR DEPOSICION FUNDIDA, filamentos de termoplástico se calientan y licúan. Un cabezal extrusor deposita una fina cuenta de material sobre una plataforma, describiendo la primera capa del objeto (igual que el pastelero adorna una tarta). La plataforma se mantiene fría para que el plástico se endurezca con prontitud. Después de que descienda la plataforma, se extrude una segunda capa, y así sucesivamente.



4. IMPRESION EN 3D: Una cuchilla extiende una capa fina de polvo de material compuesto, cerámica o de fundición sobre una plataforma; un cabezal impresor, como el de una impresora de chorro de tinta, forma el diseño deseado mediante el rociado de líquido aglomerante, que endurece el polvo en las regiones necesarias para crear la capa inicial del objeto. La plataforma desciende, se extiende más polvo, el aglomerante afirma la segunda capa, y así sucesivamente. El exceso de polvo se elimina en una fase posterior. Para aumentar la durabilidad, las últimas porciones se impregnan con cera o resina.

INDICE ANUAL

Este índice contiene los títulos de los artículos y los nombres de los autores aparecidos en Investigación y Ciencia *a partir de enero de 2005.*

MATERIAS

AUTORES

EN EL PROXIMO NUMERO...

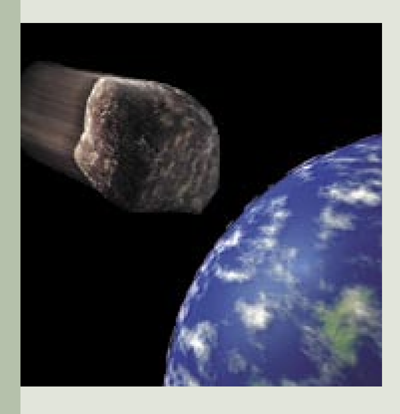
...DE ENERO 2006





LA GRAVEDAD ¿UNA ILUSION?, por Juan Maldacena

La fuerza de la gravedad y una de las dimensiones del espacio podrían surgir de las peculiares interacciones entre partículas y campos existentes en un dominio bidimensional.



¿PROCEDE LA VIDA DE OTRO MUNDO?, por David Warmflash y Benjamin Weiss

Torna la hipótesis de la panespermia. ¿Hubo microorganismos vehiculados por meteoritos?



PREPARADOS PARA UNA PANDEMIA, por W. Wayt Gibbs y Christine Soares

Una variedad de gripe altamente contagiosa y letal azotará la humanidad algún día. Sea esta amenaza inminente o remota, ¿estamos preparados para combatirla?



EVERSION Y CIERRE DE LOS DISCOS IMAGINALES, por José Carlos Pastor Pareja, Enrique Martín Blanco y Antonio García-Bellido

El ensamblaje del cuerpo de *Drosophila* adulta, a partir de 21 discos imaginales, está dirigido, en cada disco, por una población especializada de células que, en el proceso, adquieren capacidad invasiva y migratoria.

NEUROBIOLOGIA DEL YO, por Carl Zimmer

Se están dando los primeros pasos para explicar de qué modo nuestro cerebro engendra la noción de identidad propia.

